

DEOCLECIO JARDIM AMORIM

**MODELOS NÃO LINEARES E LINEARES GENERALIZADOS PARA AVALIAÇÃO
DA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MILHO E SOJA**

Botucatu

2019

DEOCLECIO JARDIM AMORIM

**MODELOS NÃO LINEARES E LINEARES GENERALIZADOS PARA AVALIAÇÃO
DA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MILHO E SOJA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Márcia Pereira Sartori

Coorientador: Prof. Dr. Edvaldo Aparecido Amaral da Silva

Botucatu

2019

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Amorim, Deoclecio Jardim, 1992-
A524m Modelos não lineares e lineares generalizados para avaliação da germinação de sementes de milho e soja / Deoclecio Jardim Amorim. - Botucatu: [s.n.], 2019
100 p.: grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2019
Orientadora: Maria Márcia Pereira Sartori
Coorientador: Edvaldo Aparecido Amaral da Silva
Inclui bibliografia

1. Milho - Germinação. 2. Soja - Germinação. 3. Modelos lineares (Estatística). 4. Modelos não lineares (Estatística). I. Sartori, Maria Márcia Pereira. II. Silva, Edvaldo Aparecido Amaral da. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: **“MODELOS NÃO LINEARES E LINEARES GENERALIZADOS PARA AVALIAÇÃO DA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MILHO E SOJA”**


AUTOR: DEOCLECIO JARDIM AMORIM

ORIENTADORA: MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI

COORDENADOR: EDVALDO APARECIDO AMARAL DA SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Dr.^a MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas - UNESP


Prof. Dr. RENATO FERNANDES CANTÃO
Física, Química e Matemática / Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba


Voluntário Livre-Docente JOÃO NAKAGAWA
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

Botucatu, 24 de janeiro de 2019.

Àos meus amados pais e irmãos, que sempre me apoiaram e lutaram comigo para poder alcançar esta conquista.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor nosso Deus todo poderoso.

Aos meus amados pais João dos Santos Amorim e Maria Lima Jardim Amorim por participarem da minha vida fornecendo o constante apoio na minha caminhada.

Aos meus irmãos Deuciane Jardim Amorim, Deucleiton Jardim Amorim, Marilane Jardim Amorim, Marisa Jardim Amorim, Antônio José Jardim Amorim e Maria Regina Jardim Amorim.

A Prof^a. Dr^a. Maria Márcia Pereira Sartori pela orientação, ensinamentos, confiança e paciência.

Ao Prof. Dr. Edvaldo Aparecido Amaral da Silva pelos ensinamentos, orientação e confiança depositada.

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos a mim concedida.

A Faculdade de Ciências Agrônômicas, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCA/UNESP), e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia - Agricultura, pela oportunidade em se tornar aluno desta renomada instituição de ensino e pesquisa.

A minha amada Jania Claudia Camilo dos Santos por todo companheirismo, amor, carinho e ensinamentos.

A todos os docentes da Pós-graduação pelos ensinamentos e incentivos que contribuíram para minha formação.

Aos Professores da Universidade Federal Maranhão (UFMA) que contribuíram com a minha formação acadêmica, em especial aos professores Gregori da Encarnação Ferrão, Isabela Cristina Gomes Pires, José Roberto Brito Freitas, Luísa Julieth Parra Serrano e Jefferson Costa de Siqueira.

Aos funcionários do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal (Agricultura) e aos da Seção de Pós-graduação, principalmente Valéria e Eliane pelo amparo e paciência.

Aos amigos da pós-graduação e membros do grupo de Modelagem e Estatística Aplicada às Ciências Agrárias-MODELSTAT: Rute Quelvia de Faria, Amanda Rithieli Pereira dos Santos, Jackson da Silva, Lucas Vasconcelos Vieira, Gabriela Nunes da Piedade, Otavio Augusto Pessotto Alves Siqueira, Keyse Cristina Mendes Lopes, Michelane Silva Santos Lima e Leandro Roberto da Cruz, que de alguma forma, contribuíram para realização deste trabalho.

Aos amigos da pós-graduação do laboratório de sementes que mesmo sem mencionar seus nomes, lembro a todos que este é um dos frutos que vocês ajudaram a crescer e se desenvolver.

Agradeço a Igreja Assembleia de Deus em Botucatu na pessoa do seu Pastor Presidente Rúben Oliveira Lima por ter me recebido como filho amado na fé.

“Para que, como está escrito: Aquele que se gloria, glorie-se no Senhor”.

1 Coríntios 1: 31

RESUMO

Dentre as características mais estudadas na indústria de sementes e bancos de germoplasma, destaca-se o potencial fisiológico, tendo em vista que sementes de maior qualidade fisiológica permitem obter uma rápida e uniforme emergência das plântulas, e conseqüentemente o estabelecimento do estande. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a germinação de sementes de milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* (L.) Merrill) por meio de modelos não lineares e lineares generalizados. Foram utilizadas as cultivares de milho: AS 1633 PRO3, 2B587 RR, 2A401PW, AL Bandeirante e BRS 4103, e de soja as cultivares: DS59716 IPRO, CD2737 RR, CD251 RR, CD2820 IPRO e CD2857 RR, ambas da safra 2016/17. Avaliou-se a germinação de 20 sementes com quatro repetições por cultivar por meio do teste de emissão da raiz primária (protrusão). A contagem das sementes germinadas foi efetuada em intervalos regulares de 6, 12 e 24 horas até 204 horas, adotando-se como critério de germinação a protrusão da raiz primária ≥ 2 mm. Os dados foram dispostos na forma de porcentagem acumulada ao longo do tempo e pela proporção de sementes viáveis em cada intervalo de tempo testado dado por uma sequência de ensaios de Bernoulli. Os dados de porcentagem acumulada ao longo do tempo foram modelados pelas curvas não lineares de Gompertz e função de Hill de quatro parâmetros e os dados de proporção foram avaliados por modelos lineares generalizados testando as funções ligação: Probit, Logit e Complemento Log Log. As cultivares de milho que apresentaram a maior velocidade de germinação foram: AL Bandeirante e BRS 4103. Para soja os melhores resultados foram observados para as cultivares CD251 RR e CD2737 RR. As metodologias corroboraram quanto à classificação da qualidade fisiológica das cultivares. A curva de Gompertz teve melhor ajuste e permitiu aplicações práticas para o estudo de germinação estabelecendo um novo parâmetro para comparação de diferentes lotes de sementes. Os modelos lineares generalizados constituem uma metodologia robusta para avaliação da germinação de sementes de diferentes lotes e espécies agrícolas permitindo estimar qualquer tempo de germinação e uniformidade.

Palavras-chave: Germinação. Velocidade de germinação. Modelos não lineares. Modelos lineares generalizados.

ABSTRACT

Among the most studied characteristics in the seed industry and germplasm banks, the physiological potential stands out, since seeds of higher physiological quality allow a quick and uniform emergence of the seedlings, and consequently the establishment of the stand. The objective of this research was to evaluate the germination of corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) seeds using nonlinear models and generalized linear. The used cultivars of corn were: AS 1633 PRO3, 2B587 RR, 2A401PW, AL Bandeirante and BRS 4103, and the soybean cultivars were: DS59716 IPRO, CD2737 RR, CD251 RR, CD2820 IPRO and CD2857 RR, both of the 2016/17 crop. The germination of 20 seeds with four replicates per cultivar was evaluated by the primary root emission test (protrusion). The germinated seeds were counted at regular intervals of 6, 12 and 24 hours up to 204 hours, with protrusion of the primary root ≥ 2 mm being the germination criterion. The data were plotted as a percentage accumulated over time and by the proportion of viable seeds at each interval of time tested given by a sequence of Bernoulli assays. The data of percentage accumulated over time were modeled by the non-linear Gompertz curves and Hill function with four parameters and the proportion data were evaluated by generalized linear models testing the linking functions: Probit, Logit and Complement Log Log. The corn cultivars with the highest germination speed were: AL Bandeirante and BRS 4103. For soybean the best results were observed for the cultivars CD251 RR and CD2737 RR. The methodologies corroborate the classification of the physiological quality of cultivars. The Gompertz curve had a better adjustment and allowed practical applications for the study of germination, establishing a new parameter for comparison of different seeds lots. The generalized linear models constitute a robust methodology to evaluate the germination of seeds of different lots and agricultural species, allowing to estimate any germination and uniformity time.

Keywords: Germination. Speed of germination. Non-linear models. Generalized linear models.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Dendograma obtido a partir dos parâmetros da curva média de Gompertz das cultivares de milho (A) e soja (B).43
- Figura 2 - Características germinativas das cultivares de milho e soja avaliadas pela função Gompertz, taxa de germinação relativa (TGR), aceleração da germinação (ACG), taxa de germinação (TG) e germinação predita (Ger).49
- Figura 3 - Tempos de germinação de cultivar de milho BRS 4103 estimados pela função de ligação Complemento Log Log.73
- Figura 4 - Dendograma incluindo os tempos de germinação e uniformidade para as sementes de milho (A) e soja (B).76
- Figura 5 - Representação das funções de ligação para as cultivares de milho: Logit (A), (B) e (C) e Probit (D).99
- Figura 6 - Representação das funções de ligação para as cultivares de soja: Probit (A) e Logit (B), (C), (D) e (E).100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliadores de qualidade de ajuste: teste de Durbin-Watson (DW), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), número de observações (n), soma de quadrados do resíduo (SQR), critério de informação de Akaike (AIC) e critério de informação bayesiano (BIC).	39
Tabela 2 - Valores de T37 e T50 obtidos modelos de Gompertz e pelo modelo de Hill de quatro parâmetros, respectivamente.	41
Tabela 3 - Distâncias Euclidianas entre as cultivares de milho e soja obtida a partir da ligação média.	44
Tabela 4 - Teste de identidade de modelos para as cultivares de milho e soja com menores distâncias Euclidianas tendo em vista os parâmetros da função Gompertz.	45
Tabela 5 - Parâmetros da curva de Gompertz para as cultivares de milho e soja.	47
Tabela 6 - Tabela padrão para o cálculo das probabilidades de germinação obtido pelas funções Probit, Logit e Complemento Log Log (CLL).	65
Tabela 7 - Critérios de ajuste e seleção de modelos para as cultivares de milho e soja.	67
Tabela 8 - Estimativa dos parâmetros dos modelos de regressão binomial ajustados aos dados de proporção na germinação de milho e soja.	69
Tabela 9 - Estimativas do T50 obtido a partir das equações da tabela 8 e intervalo experimental no qual está contido o T50.	71
Tabela 10 - Tempos de germinação e uniformidade para as cultivares de milho e soja.	74
Tabela 11 - Distâncias Euclidianas entre as cultivares de milho e soja obtida a partir do método de Ward.	77
Tabela 12 - Identidade de modelos não lineares utilizando a curva de Gompertz para avaliar a germinação das cultivares de milho: AS 1633 PRO3 e 2A401PW.	95

Tabela 13 - Identidade de modelos não lineares utilizando a curva de Gompertz para avaliar a germinação das cultivares de milho: AL Bandeirante e BRS 4103.	96
Tabela 14 - Identidade de modelos não lineares utilizando a curva de Gompertz para avaliar a germinação das cultivares de soja: CD2737 RR e CD2857 RR.	97

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	21
CAPÍTULO 1 - APLICAÇÃO DA CURVA DE GOMPERTZ AO ESTUDO DA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MILHO E SOJA.....	31
1.1 INTRODUÇÃO.....	33
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
1.4 CONCLUSÕES.....	52
REFERÊNCIAS.....	52
CAPÍTULO 2- ABORDAGEM GENERALIZADA PARA MODELAR A GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MILHO E SOJA.....	58
2.1 INTRODUÇÃO.....	60
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
2.4 CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS.....	78
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICE A – Teste de identidade de modelos tendo em vista os parâmetros da curva de Gompertz para as cultivares de milho e soja.....	95
APÊNDICE B – Gráficos para as diferentes funções de ligação utilizadas para descrever a germinação das cultivares de milho e soja.....	99

INTRODUÇÃO GERAL

Para a cultura do milho (*Zea mays* L.) juntamente com a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na safra 2018/19 estimam-se produções de aproximadamente 214 milhões de toneladas o que corresponde a quase 90% da produção brasileira de grãos segundo a Companhia Nacional do Abastecimento (BRASIL, 2018). Essas duas culturas têm se destacado no cenário nacional e mundial, nos aspectos sociais e econômicos.

O milho é originário da América Central, mais especificamente do México (FANCELLI; DOURADO NETO, 2004). Sua origem tem sido bastante estudada e várias hipóteses foram propostas, entretanto, as mais consistentes são aquelas que demonstram que o milho descende do teosinto, uma gramínea com várias espigas sem sabugo, que pode cruzar naturalmente com o milho e produzir descendentes férteis (GALINAT, 1995). Por possuir o mesmo número de cromossomos ($2n=20$), as subespécies *Zea mays* subsp. *mexicana* ou *Zea mays* subsp. *parviglumis* são os genitores do milho mais próximos capazes de produzir descendentes férteis (GALINAT, 1977; WHITE; DOEBLEY, 1998; EVANS; KERMICLE, 2001).

Em 1920, o cultivo do milho híbrido proporcionou o aumento da produtividade na agricultura americana, que produzia em torno de 2 t ha^{-1} ; já em 1930, a cultura se expandia em produtividade, sendo então lançados os híbridos duplos, estes mais acessíveis aos produtores quando comparado ao híbrido simples, então, a partir daí iniciou-se uma nova era da produção, onde os híbridos duplos passaram de uma produtividade de 2 t ha^{-1} em 1930 para 6 t ha^{-1} em 1960 (ARGENTA et al., 2003; SANGOI et al., 2003).

A safra mundial de milho descrita pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) prevê uma redução de 3,9% na produção de milho nos EUA, devido à expectativa de menor produtividade e área plantada, de acordo com a previsão do levantamento 2018/19. A China, que é o segundo maior produtor mundial de milho, representa uma produção estimada em 225 milhões de toneladas; já para o Brasil, terceiro maior produtor mundial, foi projetado um aumento de 10,3% de produção, conforme o volume colhido na safra 2017/18, de acordo com a estimativa de área plantada e produtividade (FIESP, 2018).

A área de milho cultivada no Brasil foi de 16,8 milhões de hectares, na safra de 2018/2019, que corresponde à produção de aproximadamente 91 milhões de toneladas, com uma produtividade média de 5.408,00 kg ha⁻¹ (BRASIL, 2018). Entretanto, apesar da elevada importância da cultura, essa produtividade ainda é considerada baixa, pois há relatos de produtividades superiores para a cultura que em condições ideais de cultivo, possui capacidade para atingir até 19.113,00 kg ha⁻¹ (ASSIS et al., 2006).

Assim, o milho tem assumido relevante papel socioeconômico devido as suas diversas formas de utilização, que abrangem desde a alimentação humana ou animal, até a indústria tecnológica, o que faz com que a produção se eleve no Brasil (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2006; COUTO et al., 2017). O aumento em produtividade da cultura do milho é reflexo da utilização de cultivares com elevado potencial produtivo, adaptada as mais diversas condições ambientais aliada ao uso de tecnologias avançadas (CRUZ, 2013).

Já a soja é uma espécie originária da Manchúria, que é uma região da China, cuja origem e domesticação possuem relatos há mais de cinco mil anos, possui como ancestral selvagem a espécie *Glycine soja* Siebold & Zucc (KIIHL et al., 2003; EMBRAPA, 2018). A soja é uma espécie autógama, pertencente à família Fabaceae, com sementes ricas em proteína (40%) e óleo (20%), tornando-a um alimento extremamente importante para humanos e animais (CHUNG; SINGH, 2008).

A cultura da soja se desenvolve bem em uma ampla distribuição geográfica, mas para que a cultura apresente rendimentos elevados, no Brasil, as melhores condições climáticas para o cultivo foram registradas em regiões que possuem fotoperíodo curto. Dessa forma, mesmo a soja apresentando ampla diversidade genética relacionada à área de adaptação, essa leguminosa necessita de fotoperíodo e temperatura controlados, uma vez que exige um período mínimo de ausência de luz para indução floral. Esse período é variável para cada cultivar e depende da latitude da região. Assim, cada cultivar de soja possui uma adaptabilidade diferenciada que depende da latitude, seja na região Sul ou ao Norte (VAZ BISNETA, 2015).

O Brasil ampliou suas fronteiras agrícolas para atender as demandas nacionais e internacionais da cultura da soja, inserindo a cultura desde o paralelo 32 °S (RS) até o 2 °N (AP). Essa expansão foi permitida devido ao desenvolvimento de

tecnologia nacional para produção de soja, assim como a criação de novos cultivares adaptados às diferentes condições ecofisiológicas (ALBERINI et al., 1992; KASTER; MENOSSO, 1992; KIIHL; ALMEIDA, 1992; MIRANDA, 1992; SEDIYAMA, 1992; VELLO, 1992).

Para a safra 2018/19, a área estimada para o cultivo de soja foi de cerca de 36 milhões de hectares, com a produção estimada em aproximadamente 119 milhões de toneladas contando com uma produtividade média de 3,302 kg ha⁻¹ mantendo o Brasil como o segundo maior produtor mundial (BRASIL, 2018). A soja atualmente é utilizada com a finalidade para produção de biodiesel, com cerca de 80% da produção nacional em biocombustível sendo produzido a partir do óleo de soja.

Os estados que se destacam como maiores produtores da cultura da soja são os estados do Mato Grosso, este informado como o maior produtor, produzindo cerca de 20 milhões de toneladas de soja por ano, em seguida vem o estado do Paraná, com produção de 15 milhões de toneladas, o Rio Grande do Sul com 11 milhões, Goiás com 8 milhões de toneladas e o estado do Mato Grosso do Sul, com 5 milhões (BRASIL, 2018).

Desse modo, a soja apresenta grande importância econômica, destacando-se como matéria-prima para formação de diversos produtos, sendo utilizada na produção do biodiesel, alimentação humana, animal e indústria farmacêutica (HASSE, 1996). O teor de óleo e proteína presente no grão despertou o interesse industrial, permitindo à cultura atingir o patamar das mais importantes commodities transacionais no mercado internacional (MARTIN, 2005).

O milho e a soja fazem parte dos 80% das culturas economicamente significativas que fazem uso das sementes de maneira direta ou indiretamente para se estabelecer em campo (MARCOS FILHO, 2015a). Como resultado, a emergência rápida e uniforme de mudas vigorosas é um dos principais pilares para o sucesso da produção agrícola. Entretanto, para a manutenção e aumento da produtividade é necessário o emprego de sementes de alta qualidade (MARCOS FILHO, 2015b; PIZÁ et al., 2018).

Entende-se como qualidade de sementes, a soma de quatro características básicas, que abrangem o potencial genético, fisiológico, físico e sanitário. Dentre as características mais estudadas na indústria de sementes e bancos de germoplasma,

destaca-se o potencial fisiológico, pois sementes de maior qualidade fisiológica permitem obter uma rápida e uniforme emergência das plântulas, e conseqüentemente, estabelecimento do estande, podendo afetar a uniformidade e o desenvolvimento, bem como o rendimento final da cultura, a qualidade do produto e a maior longevidade (FRANÇA NETO et al., 2010; MARCOS FILHO, 2015b).

Segundo Marcos Filho (2015b), o potencial fisiológico reúne informações sobre a germinação (viabilidade) e o vigor de sementes. Nesses termos, Berlyn (1972) definiu germinação como o encerramento do repouso fisiológico, o qual pode ser definido como a transformação embrionária do eixo em plântula, que depende de uma série de transformações complexas interligadas física ou quimicamente, ou ainda em uma abordagem um pouco mais atual, a germinação pode ser definida como a reativação do crescimento do embrião, a qual resulta na ruptura da cobertura da semente e emergência da plântula (COPELAND; MCDONALD, 1995).

De acordo com a *International Seed Testing Association/ISTA* (1995), o vigor das sementes é determinado como o potencial máximo de desempenho e atividade da semente, que pode ser verificado durante a germinação ou emergência das plântulas; outro conceito descrito pela *Association of Official Seed Analysts/AOSA* (1983), é que o vigor é um conjunto de propriedades capazes de determinar a germinação rápida e uniforme no desenvolvimento de plântulas normais, em diferentes condições ambientais. O vigor de uma semente é a “força motriz” durante o processo germinativo que pode ser relatado como energia a nível biológico utilizada pela semente na realização de tarefas, tendo seus efeitos manifestados em diferentes formas durante o armazenamento e no campo (GRABE, 1976; CARVALHO, 1986).

É importante ressaltar que a perda de vigor das sementes está relacionado com o processo de deterioração, uma vez que reduz as atividades respiratórias e biossintéticas devido à degradação das membranas celulares, reduzindo a germinação e desencadeando uma maior sensibilidade às condições ambientais (DELOUCHE; BASKIN, 1973).

Para decidir qual lote de sementes possui o maior potencial fisiológico existe a necessidade da avaliação da germinabilidade e a identificação de amostras com maior chance de apresentar desempenho satisfatório no campo ou durante o armazenamento. Para isso, surgiu a avaliação da qualidade fisiológica de sementes,

que pode ser realizada através do teste de germinação. Esse teste se revelou como base confiável para aprimorar o comércio do fornecimento de sementes viáveis, o qual permitiu atingir níveis confiáveis e aceitáveis de reprodutibilidade (SILVA, 2006; MARCOS FILHO, 2015).

Conforme o aumento da demanda por sementes durante todo o ano, as empresas fornecedoras de sementes necessitam de métodos eficientes para armazená-las por maior período de tempo, sendo de fundamental importância à classificação dos lotes em relação ao vigor (COIMBRA, 2007). Segundo Vieira e Carvalho (1994), os testes de germinação e vigor das sementes servem como auxílio para as tomadas de decisões das empresas produtoras de sementes em relação ao destino dos lotes quanto à viabilidade.

Dessa forma, os testes de vigor são utilizados para auxiliar o teste de germinação, a fim de detectar diferenças não perceptíveis durante a germinação, o que desencadeia uma importante tarefa na escolha do método adequado de avaliar o vigor das sementes (MARCOS FILHO, 2015a). Existe uma relação direta entre velocidade de germinação e vigor das sementes, os quais se baseiam no princípio da diferença de germinação nos lotes, sendo que as sementes que apresentam maior velocidade de germinação são mais vigorosas (SILVA, 2006).

Na literatura, o monitoramento e avaliação da qualidade fisiológica, geralmente são avaliados pela capacidade de germinar (LEPRINCE et al., 2017; RAO et al., 2017; BELMONT et al., 2018). Para isso são conduzidos ensaios em que são avaliados parâmetros como a velocidade para 50% das sementes viáveis germinarem (T50), germinação máxima, uniformidade de germinação, que é a diferença de tempo entre duas germinações, entre outros parâmetros de interesse (JOOSEN et al., 2010; MATTHEWS et al., 2012; HATZIG et al., 2015; NETO et al., 2018).

O parâmetro T50 na área de sementes possui a mesma interpretação prática que as doses efetivas ou letais (DL50/CL50) utilizadas, por exemplo, na ciência das plantas daninhas e toxicologia (RITZ, 2010; KÜPPER et al., 2017). Autores como Matthews et al. (2012) utilizaram esse parâmetro como uma tentativa de padronizar o teste de vigor por meio do teste de radículas (protrusão). Onwimol et al. (2012), conseguiram prever os processos de deterioração como resultado de comprometimento do metabolismo ou DNA na fase inicial de germinação de

sementes. Hatzig et al. (2015) estudaram regiões genômicas em *Brassica napus* numa tentativa de verificar os genes associados à velocidade de germinação e uniformidade.

Outro parâmetro bastante empregado pelos pesquisadores na área de sementes é a uniformidade de germinação (COOLBEAR; MCGILL, 1990; JOOSEN et al., 2010; NETO et al., 2018). Sabe-se que a velocidade e uniformidade de emergência são parâmetros fundamentais para o sucesso do estande, assim as pesquisas voltadas à tecnologia de sementes investem em avanços de modo a contribuir com o desenvolvimento de procedimentos para avaliar o potencial fisiológico de sementes, principalmente de espécies que apresentam um elevado potencial produtivo, como a soja e o milho.

Várias medidas de uniformidade de germinação são apresentadas na literatura, como por exemplo: a uniformidade entre o tempo T90 e T10 (U9010) (COOLBEAR; MCGILL, 1990); uniformidade entre o T75 e T25 (U7525) (JOOSEN et al., 2010); uniformidade entre T84 e T16 (U8416) (NETO et al., 2018). De forma geral, esses valores de uniformidade são escolhidos a critério do pesquisador.

Na pesquisa agrônômica, constantemente temos a necessidade de fazer escolhas entre lotes de semente ou cultivares. Como suporte a essas escolhas estão os estudos de curvas de crescimento, que auxiliam na tomada de decisões quanto à qualidade fisiológica de sementes.

Dentre as características usadas para representar o processo germinativo das sementes tem-se a porcentagem de germinação acumulada no tempo, que serve de substrato para análise da curva de crescimento, ao relacionar a porcentagem de germinação com o tempo de germinação, podendo ser utilizada na definição de programas de melhoramento genético de cultivares, bem como para o cálculo de tempos de germinação específicos, como T50 (HATZIG et al., 2015; NETO et al., 2018).

De maneira geral, estuda-se germinação acumulada ao longo do tempo por regressões não lineares (EL-KASSABY et al., 2008; JOOSEN et al., 2010; NETO et al., 2018), que têm como característica principal a capacidade de sintetizar o processo biológico em poucos parâmetros matemáticos com significado biológico, facilitando assim, a compreensão do fenômeno (FIGUEIREDO FILHO et al., 2012).

O modelo mais empregado atualmente para avaliar a germinação, é a função de Hill de quatro parâmetros, proposta por El-Kassaby et al. (2008). No entanto, existem outras funções, como por exemplo, a função de Gompertz com três parâmetros que possui propriedades desejáveis para o estudo da germinação por meio de suas derivadas (FIALHO, 1999).

A curva de Gompertz é muito utilizada na área animal (FIALHO, 1999; FIGUEIREDO FILHO et al., 2012; GHIASI; LUPI; MOKHTARI, 2018), Porém vale ressaltar que esta função foi empregada em outras situações, assim como descrito por Berti, Johnson e Manthey (2007) que descreveram a maturidade fisiológica de sementes de *Cuphea*; Gaspar-Oliveira et al. (2008) que avaliaram a duração do teste de germinação e De Bem et al. (2017) que estudaram as características produtivas de *Crotalaria juncea* utilizando essa função.

A baixa utilização da curva de Gompertz se deve ao tradicionalismo das curvas logísticas (CALHA; MOREIRA; ROCHA, 2008; GAZOLA et al., 2011; EL-KASSABY et al., 2008; JOOSEN et al., 2010; NETO et al., 2018). Este fato coloca em evidência que nem sempre os pesquisadores realizam ajustes comparativos entre modelos, com objetivo de identificar aquele que melhor descreve o fenômeno de interesse, por exemplo, a germinação acumulada de sementes.

No entanto, vale ressaltar que a abordagem clássica por meio dos modelos de regressão em dados cumulativos, como é caso dos dados de germinação, podem incorrer em erros sobre as pressuposições do modelo como, por exemplo, autocorrelação residual (ONOFRI; GRESTA; TEI, 2010; RITZ; PIPPER, STREIBIG, 2013).

Onofri; Gresta e Tei (2010) descrevem que a germinação é um processo qualitativo, com resposta binária, ou seja, só existem dois possíveis resultados: a ocorrência da germinação ou não ocorrência. Assim, cada erro $\varepsilon_i = Y_i - (\beta_0 + \beta_1 X_i)$ pode assumir um dos dois valores $Y_i = 1 \Rightarrow \varepsilon_i = 1 - \beta_0 - \beta_1 X_i$ ou $Y_i = 0 \Rightarrow \varepsilon_i = -\beta_0 - \beta_1 X_i$, gerando variâncias heterogêneas e existindo uma restrição na função resposta $0 \leq E(Y) = \pi \leq 1$.

Uma alternativa para análise desse tipo de dado é a teoria dos modelos lineares generalizados. Os modelos lineares generalizados (MLGs) surgiram para romper as barreiras impostas pela normalidade da variável resposta, bem como da suposição

da homogeneidade das variâncias e independência dos erros. Assim, Nelder e Wedderburn (1972) iniciaram um novo ciclo de modelos de regressão.

Com o advento do aparato computacional, os modelos MLGs desenvolvidos por Nelder e Wedderburn (1972) vêm ganhando espaço entre os pesquisadores, pois permitem interpretações práticas dos parâmetros, sendo que em diversos ensaios, o pesquisador está interessado em avaliar as influências que uma ou mais variáveis explicativas (X_1, X_2, \dots, X_n) exercem sobre as variáveis respostas de interesse (Y).

As variáveis explicativas compõem a parte linear do modelo e podem ser quantitativas, qualitativas ou ambas. Já a variável resposta pode ser discreta, contínua e categórica, e estas podem assumir diferentes distribuições de probabilidades. Por exemplo, na indústria sementeira os dados de germinação podem assumir proporções cuja distribuição binomial se mostra adequada (McCULLAGH; NELDER, 1989; HAY; MEAD; BLOOMBERG, 2014; MURPHEY et al., 2015).

Segundo Nelder e Wedderburn (1972) e McCullagh e Nelder, (1989) os MLGs apresentam três componentes:

- a) O primeiro componente é dito aleatório, representado por variáveis independentes, sendo as variáveis respostas, Y_1, \dots, Y_n , com a mesma distribuição de probabilidade pertencente à família exponencial na forma canônica, representada pela expressão:

$$f(y_i; \theta_i, \phi) = \exp\{\phi^{-1}[y_i\theta_i - b(\theta_i)] + c(y_i, \phi)\}, i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

em que $E(Y_i) = \mu_i = b'(\theta_i)$ e $\text{Var}(Y_i) = \phi b''(\theta_i) = \phi V_i$ sendo $V_i = V(\mu_i) = d\mu_i/d\theta_i$ a função de variância, $\phi^{-1} > 0$, o parâmetro de dispersão e θ , o parâmetro canônico (CORDEIRO; DEMÉTRIO, 2008).

- b) O segundo componente é chamado de sistemático, pois constitui a estrutura linear do modelo, denotado como:

$$\eta_i = \sum_{j=1}^p X_{ij}\beta_j \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

sendo, X_1, \dots, X_n , covariáveis que constituem a estrutura do modelo.

- c) O terceiro componente é a função de ligação que faz a ligação entre os dois primeiros componentes, ou seja, faz ligação entre a média μ_i e o preditor linear η_i .

Para modelar dados de proporção os modelos mais usados são o logístico, Probit e o complemento Log Log e ao contrário dos demais modelos de regressão clássica esses modelos permitem avaliar uma grande gama de tempos efetivos, pois o preditor linear é uma regressão linear simples do tipo $F(\pi_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i$, em que π_i é a probabilidade de sucesso do evento sob estudo, $F(.)$ uma f.d.a. de interesse e x_i é a variável exploratória. Esses modelos, ajustados sobre o conjunto de dados, fornecem os parâmetros $\hat{\beta}_0$ e $\hat{\beta}_1$ que formam a base para comparação dos diferentes tipos de dados ou tratamentos (CORDEIRO; DEMÉTRIO, 2008). Na área de sementes o tempo efetivo mais calculado é o T50 (JOOSEN et al., 2010; MATTHEWS et al., 2012; HATZIG et al., 2015; NETO et al., 2018) e com a utilização dos MLGs esse tempo pode ser obtido facilmente pelos modelos logístico e Probit bastando igualar os termos da equação a zero.

Para modelar a probabilidade de um evento de interesse, precisamos considerar a escolha da função de ligação. Para seleção de modelos são adotados vários critérios, dentre eles os mais empregados na literatura são: *Deviance*, que é utilizado como uma medida de discrepância, o uso desse critério pode ser observado nos trabalhos de Liska et al. (2015); Moral; Hinde e Demétrio (2017), e os critérios de informação de Akaike (AIC) e bayseano (BIC) nos trabalhos de Akaike (1974) e Schwarz, (1978). Todavia, nem sempre os pesquisadores fazem análise comparativa entre funções de ligação, e acabam sendo levados pelo tradicionalismo do emprego de uma determinada função.

A função Logit, por exemplo, é amplamente utilizada na área de biometria (DEMÉTRIO, 2002; NUNES et al., 2004; NATTINO; LU, 2018), ao passo que a maioria dos trabalhos conduzidos para avaliar a qualidade fisiológica de sementes a função Probit é utilizada (ELLIS; ROBERTS, 1980; HAY; MEAD; BLOOMBERG, 2014; DAIBES; CARDOSO, 2018) e em dados entomológicos costuma-se utilizar o Complemento Log Log (MALLET, 1989; LIMA, 2017). Nada obstante, Barros (2008), alerta que na maioria das vezes o processo de escolha das funções de ligação ocorre simplesmente por convergência matemática e computacional. Por isso, são

justificáveis estudos que comparem funções de ligação para modelar a probabilidade do evento de interesse, permitindo a seleção do modelo mais adequado (FREITAS, 2013).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar os parâmetros da germinação de sementes de milho e soja. Descrita por modelos não lineares (Capítulo 1) e lineares generalizados (Capítulo 2), investigando qual modelo não linear e quais funções de ligação seriam mais adequadas para prever o potencial fisiológico.

CAPÍTULO 1

APLICAÇÃO DA CURVA DE GOMPERTZ AO ESTUDO DA GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MILHO E SOJA

RESUMO

A principal forma de mensurar a qualidade fisiológica de uma população de sementes é pela capacidade de germinação. Geralmente, a germinação de sementes é expressa em porcentagem acumulada ao longo do tempo exibindo um comportamento matemático sigmoidal que pode ser modelado por regressões não lineares. Os modelos logísticos têm sido os mais empregados para avaliação da germinação, destacando-se a função de Hill de quatro parâmetros, no entanto, existem outras funções que podem ser empregadas como, por exemplo, função de Gompertz. Assim, os objetivos desse trabalho foram: (i) avaliar a germinação de sementes de milho e soja identificando qual modelo não linear é o mais apropriado para descrever a germinação e (ii) aplicar as propriedades do modelo selecionado para prever o potencial fisiológico. Para isso, avaliou-se a germinação de 20 sementes com quatro repetições por meio do teste de emissão da raiz primária (protrusão) de 10 cultivares, sendo cinco de milho e cinco de soja. Os resultados foram expressos em porcentagem de emissão de raiz primária acumulada ao longo do tempo. O melhor modelo foi selecionado considerando o teste de Durbin-Watson, R^2_{aj} , AIC e BIC. O modelo de Gompertz foi selecionado para avaliar a germinação independentemente da cultivar ou espécie fornecendo parâmetros com aplicações biológicas para avaliação do potencial fisiológico como o T37 (tempo necessário para 37% das sementes viáveis germinarem). Os melhores índices de qualidade de sementes foram observados para as cultivares de milho AL Bandeirante e BRS 4103. Para soja as sementes das cultivares CD251 RR e CD2737 RR obtiveram os melhores resultados. Portanto, O modelo de Gompertz mostrou-se como o modelo mais adequado para a avaliação da germinação e qualidade fisiológica de sementes de milho e soja. O T37 foi estabelecido como um novo parâmetro para comparar qualidade fisiológica de sementes.

Palavras-chave: Qualidade fisiológica. Vigor. *Zea mays* L. *Glycine max* (L.) Merrill. Modelos não lineares.

APPLICATION OF GOMPERTZ CURVE TO THE STUDY OF CORN AND SOYBEAN SEED GERMINATION

ABSTRACT

The main way of measuring the physiological quality of a seed population is by the germination capacity. Generally, seed germination is expressed as a percentage accumulated over time exhibiting a sigmoidal mathematical behavior that can be modeled by non-linear regressions. The logistic models have been the most used to evaluate the germination, highlighting the Hill function of four parameters, however, there are other functions that can be used, such as Gompertz function. Thus, the objectives of this work were: (i) to evaluate the germination of corn and soybean seeds, identifying which nonlinear model is most appropriate to describe the germination, and (ii) to apply the properties of the selected model to predict the physiological potential. For this, the germination of 20 seeds with four replicates was evaluated by means of the test of emission of the primary root (protrusion) of 10 cultivars, being five of corn and five of soybean. The results were expressed as percentage of primary root emission accumulated over time. The best model was selected considering the test Durbin-Watson, R^2_{aj} , AIC and BIC. The Gompertz model was selected to evaluate the germination independently of the cultivar or species providing parameters with biological applications to evaluate the physiological potential as the T37 (time necessary for 37% of the viable seeds to germinate). The best seed quality indexes were observed for cultivars of corn AL Bandeirante and BRS 4103. For soybeans, the seeds of the cultivars CD251 RR and CD2737 RR obtained the best results. Therefore, the Gompertz model proved to be the most suitable model for the evaluation of the germination and physiological quality of corn and soybean seeds. T37 was established as a new parameter to compare physiological seed quality.

Keywords: Physiological potential. Vigour. *Zea mays* L. *Glycine max* (L.) Merrill. Non-linear models.

1.1 INTRODUÇÃO

As informações sobre germinação (viabilidade) e vigor de sementes reunidas permitem estimar a capacidade teórica de um lote de sementes manifestar adequadamente suas funções vitais após a semeadura (MARCOS FILHO, 2015). É a principal forma de monitorar a viabilidade e vigor de sementes é pela capacidade de germinação (DINIZ et al., 2013; MARCOS FILHO, 2015; BELMONT et al., 2018).

A capacidade de germinação segundo Copeland e McDonald (1995) é a reativação do crescimento do embrião, a qual resulta na ruptura da cobertura da semente e emergência da plântula. Geralmente, o processo germinativo é representado pela porcentagem de germinação acumulada no tempo exibindo uma curva de comportamento sigmoideal (BEWLEY et al., 2013; SOUSA et al., 2014), que apresenta um crescimento inicial lento com um posterior aumento exponencial e, em seguida, um aumento de menor intensidade. Esse comportamento é típico dos modelos de regressão não lineares, conhecidos como “modelos de crescimento” (SOUSA et al., 2014; SARI et al., 2019).

Na agropecuária, o uso de modelos de crescimento possui ampla aplicação. Os modelos de crescimento podem ser utilizados para descrever um processo biológico, como o ganho de peso em animais (FIGUEREDO FILHO et al., 2012; ESPILGOLAN et al., 2013; GHIASI; LUPI; MOKHTARI, 2018), crescimento de frutos (FERNANDES; PEREIRA; MUNIZ, 2017; RIBEIRO et al., 2018) ou crescimento de plantas (DE BEM et al., 2017). Vários modelos têm sido propostos para modelar curvas de crescimento, como Logístico, Gompertz, Von Bertalanffy, Richards e Weibull (RATKOWSKY, 1983; ARRUDA et al., 2018). Esses modelos podem apresentar várias formas funcionais dependendo do objetivo ou do problema a ser tratado.

Em estudos de curvas de germinação para determinar a qualidade fisiológica de sementes observa-se uma tendência quanto à utilização dos modelos da família logística com destaque para função de Hill de quatro parâmetros (EL-KASSABY et al., 2008; JOOSEN et al., 2010; NETO et al., 2018), tal fato coloca em evidência que nem sempre os pesquisadores realizam ajustes comparativos entre modelos, com objetivo de identificar aquele que melhor descreve o fenômeno de interesse, descartando a hipótese que outros modelos poderiam ter melhor ajuste, além de fornecerem conclusões mais robustas.

Dessa maneira, ressalta-se a importância de realizar comparações entre modelos de regressão para prever o potencial fisiológico de sementes. Um modelo alternativo que pode ser empregado para prever o potencial fisiológico de sementes é o modelo de Gompertz. Por exemplo, Gaspar-Oliveira et al. (2008) e Sousa et al. (2014) utilizaram o modelo Gompertz para avaliar a duração do teste de germinação e descrever a germinação de sementes de café. Entretanto, esses estudos avaliaram apenas a adequação do modelo aos dados e não exploram a interpretação prática dos parâmetros para fisiologia e tecnologia de sementes.

A principal justificativa para os pesquisadores da área de sementes quanto a utilização dos modelos logísticos é a possibilidade de determinar de forma direta o parâmetro conhecido como T50 (tempo necessário para germinar 50% das sementes viáveis) (EL-KASSABY et al., 2008; JOOSEN et al., 2010; NETO et al., 2018) considerando o processo de germinação como simétrico, no entanto, sabemos que na maioria das vezes o tempo necessário para que a primeira metade da população conclua a germinação é mais curto que a segunda metade (BEWLEY et al., 2013).

Ao contrário, dos modelos logísticos utilizados para determinar o T50, a curva de Gompertz possui um ponto de inflexão em torno de 37% do valor máximo o que é vantajoso do ponto de vista da descrição do processo biológico da germinação, pois, como já mencionado, a germinação não possui comportamento simétrico. Segundo Fialho (1999), as características da curva de Gompertz giram em torno do ponto de inflexão, sendo este utilizado como um parâmetro que indica precocidade (FIGUEIREDO FILHO et al., 2012; ESPIGOLAN et al., 2013; ARRUDA et al., 2018).

Portanto, a abscissa do ponto de inflexão pode ser determinada a fim de prever o tempo que ocorre 37% da germinação das sementes viáveis (T37). Esta informação pode ser usada para determinar o potencial fisiológico de sementes de culturas agrícolas como sementes de milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Além disso, o estudo das derivadas do modelo de Gompertz pode ter importantes aplicações para fisiologia e tecnologia de sementes.

De acordo com os aspectos apresentados, os objetivos desse trabalho foram: (i) avaliar a germinação de sementes de milho e soja identificando qual modelo não linear é o mais apropriado para descrever a germinação; e (ii) aplicar as propriedades do modelo selecionado para prever o potencial fisiológico.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Local do experimento e origem do material vegetal

A pesquisa foi desenvolvida no laboratório de Análise de Sementes do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, localizada no município de Botucatu-SP (22° 51’ S de latitude, 48° 26’ W de longitude, e 786 m de altitude). Foram utilizadas sementes de milho das cultivares: AS 1633 PRO3, 2B587 RR, 2A401PW, AL Bandeirante e BRS 4103. E de soja as cultivares: DS59716 IPRO, CD2737 RR, CD251 RR, CD2820 IPRO e CD2857 RR referentes à safra 2016/17.

1.2.2 Obtenção dos dados

Avaliou-se a germinação de 20 sementes com quatro repetições por cultivar por meio do teste de emissão da raiz primária (protrusão). Para tanto, as sementes de milho e soja foram distribuídas em folhas de papel toalha tipo “germitest” umedecidas com a quantidade de água equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco, o teste foi realizado entre o papel em placas de “petri” e estas foram mantidas em câmara de germinação Biochemical Oxygen Demand (B.O.D), regulada para a temperatura de 25 °C. A contagem das sementes germinadas foi efetuada em intervalos regulares de 6, 12 e 24 horas até 204 horas, adotando-se como critério de germinação a protrusão da raiz primária ≥ 2 mm. Os resultados foram expressos em porcentagem de sementes germinadas acumulada no tempo.

1.2.3 Modelos não lineares

Inicialmente, para o estudo da germinação das sementes de milho e soja foram considerados os modelos não lineares, função de Hill de quatro parâmetros (3) e Gompertz (4), com o objetivo de identificar o modelo mais eficiente para descrever a germinação, dados por:

$$Ger = y_0 + \frac{At^b}{c^b + t^b}, \quad (3)$$

$$Ger = A e^{-e^{-B(t-c)}} \quad (4)$$

em que “Ger” é a germinação acumulada em porcentagem no tempo t (horas), “y0” é o intercepto no eixo Ger, “A” é a germinação assintótica em porcentagem quando t tende ao infinito, “b” é o parâmetro que controla a forma da curva em (3), “B” em (4)

é a germinação relativa no ponto de inflexão (%G/hora por %G), “e” é igual a 2,718281828459, “c” é o tempo necessário para 50% das sementes viáveis germinarem (T50) em (3) e “C” em (4) é o tempo t em que ocorre o ponto de inflexão que corresponde ao tempo necessário para 37% das sementes viáveis germinarem (T37).

A função de Gompertz possui propriedades desejáveis para avaliação da germinação, sendo que tais propriedades giram em torno do ponto de inflexão, sendo a taxa de germinação máxima nesse ponto. Assim, caso o modelo de Gompertz seja julgado o mais eficiente, os parâmetros como a taxa de germinação relativa (TGR) em (5), aceleração da germinação (ACG) em (6) e taxa de germinação (TG) em (7) serão calculados conforme as expressões:

$$TGR = \frac{dGer/dt}{Ger} = A B e^{-B(t-C)-e^{-B(t-C)}} \quad (5)$$

$$ACG = \frac{d^2GER}{dt^2} = A B^2 e^{-B(t-C)-e^{-B(t-C)}} (e^{-B(t-C)} - 1) \quad (6)$$

$$TG = \frac{dGer}{dt} = B Ger \ln\left(\frac{A}{Ger}\right). \quad (7)$$

1.2.4 Ajuste e seleção dos modelos

Para o ajuste dos modelos, utilizou-se o procedimento PROC MODEL do sistema SAS® - Statistical Analysis System, versão 9.4. Os parâmetros dos modelos foram estimados usando o método dos mínimos quadrados, usando a abordagem de Marquardt. A presença de autocorrelação residual foi realizada pelo teste de Durbin-Watson a 5% de probabilidade considerando a estrutura de erros independentes com auxílio da tabela elaborada por Savin e White (1996), tendo como regra, se $D > D_U$, não existe correlação; se $D < D_L$, existe uma correlação positiva; se D estiver entre os dois limites, o teste é inconclusivo.

A seleção do modelo teve como base, além das características biológicas relacionadas aos parâmetros, a qualidade do ajuste obedecendo aos seguintes critérios:

- 1- Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), dado por: $R^2_{aj} = 1 - \left[\frac{(n-1)(1-R^2)}{(n-q)} \right]$, em que R^2 é o coeficiente de determinação não ajustado, n é o número de observações e q é o número de parâmetros do modelo;
- 2- Critérios de informação de Akaike (AIC) (AKAIKE, 1974) e Bayseano (BIC) (SCHWARZ, 1978), dados por: $AIC = n \ln(SQR/n) + 2p$, $BIC = n \ln(SQR/n) + p \ln(n)$ em que SQR soma de quadrado do resíduo do modelo, p é o número de parâmetros do modelo, n é o tamanho da amostra. Ambos os critérios penalizam a falta de ajuste aos dados e a complexidade do modelo, de modo que os menores valores são preferidos (EMILIANO; VIVANCO; MENEZES, 2014).

1.2.5 Análise de variância do T37 e T50

Mesmo após a seleção do modelo mais eficiente para descrever a germinação realizou-se o ajuste das funções de Gompertz e Hill para cada repetição obtendo dessa forma, os T37 e T50, com intuito de validar o uso do T37 para comparação de lotes de semente. Posteriormente, foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk (modificado) (RAHMAN; GOVINDARAJULU, 1997), seguindo-se com a análise univariada com a aplicação do teste LSD de Fisher a 5% de probabilidade considerando o delineamento inteiramente casualizado.

1.2.6 Análise de agrupamento e identidade de modelos

Aplicou-se a análise de agrupamento nos parâmetros das curvas médias do modelo selecionado por meio da ligação média, utilizando a distância Euclidiana. Esse método de agrupamento foi escolhido por ser aquele que proporcionou maior coeficiente cofernético, portanto uma maior consistência da análise de agrupamento (SILVA; DIAS, 2013).

As cultivares que apresentaram as menores distâncias Euclidianas foram submetidas ao teste de identidade de modelos não lineares e de igualdade de qualquer subconjunto de parâmetros, por meio do teste da razão de verossimilhança, com aproximação pela estatística qui-quadrado, a 5% de significância, conforme proposto por Regazzi (2003), com intuito de ajustar uma única curva de germinação. Para tanto, utilizou-se o procedimento "NLIN" do sistema

SAS® - Statistical Analysis System, versão 9.4, empregando o método iterativo de Marquardt com auxílio de variáveis *dummy*.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ajustando os modelos de Hill e Gompertz para as 10 cultivares testadas, observou-se que, para ambos os modelos não foi detectada a presença de autocorrelação de primeira ordem de acordo com o teste de Durbin-Watson (DW), pois os valores de DW foram superiores aos limites superiores da tabela elaborada por Savin e White (1996), a 5% de probabilidade (Tabela 1). Assim, não foi necessário o ajuste de modelos autoregressivos de primeira ordem.

A principal implicação da presença de autocorrelação está na estimativa imprecisa dos erros padrões (ONOFRI; GRESTA; TEI, 2010; RITZ, 2013), que por consequência refletem no nível de significância dos parâmetros que podem ser potencialmente enganosos. Nesse sentido, a rejeição da hipótese de autocorrelação residual permite a modelagem dos dados germinativos das cultivares em estudo por modelos não lineares.

Na comparação dos modelos (Tabela 1), pode-se observar que ambas as funções tiveram R^2_{aj} acima de 0,90, ou seja, mais de 90% da variação na resposta é explicada pelos modelos, no entanto, como as diferenças entre os R^2_{aj} são muito pequenas para selecionar o melhor modelo, os critérios de informação AIC e BIC também foram analisados. Os menores valores de AIC e BIC foram observados para o modelo Gompertz, independentemente da cultivar ou espécie (Tabela 1).

O AIC e BIC são critérios clássicos de seleção de modelos que penalizam a falta de ajuste aos dados e a complexidade do modelo, de modo que aqueles modelos com menores valores são considerados os mais adequados (RESENDE, 2007; EMILIANO; VIVANCO; MENEZES, 2014). Desse modo, o modelo de Gompertz foi escolhido para modelar a variável resposta, germinação acumulada.

Assim, destaca-se a importância deste trabalho em relação à análise comparativa de modelos, ou seja, não se pode predeterminar um modelo sem antes realizar um estudo do comportamento dos dados. Resultados favoráveis também foram observados por Sousa et al. (2014), comparando a qualidade de ajuste de modelos logísticos com a função de Gompertz para descrever a germinação de

sementes de café; Ribeiro et al. (2018), também relatou melhor qualidade de ajuste do modelo de Gompertz para descrever o crescimento de frutos de pequi quando comparado com outros modelos não lineares.

Tabela 1 - Avaliadores de qualidade de ajuste: teste de Durbin-Watson (DW), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), número de observações (n), soma de quadrados do resíduo (SQR), critério de informação de Akaike (AIC) e critério de informação bayesiano (BIC).

Milho							
Modelo	Cultivares	DW	R^2_{aj}	n	SQR	AIC	BIC
Gompertz	AS 1633 PRO3	3,3484 ^{NS}	0,9452	44	2399,30	181,9447	187,2972
Hill	AS 1633 PRO3	3,3547 ^{NS}	0,9448	44	2355,80	183,1396	190,2764
Gompertz	2B587 RR	2,1221 ^{NS}	0,9893	56	1101,80	172,8435	178,9196
Hill	2B587 RR	2,0924 ^{NS}	0,9890	56	1109,50	175,2335	183,3349
Gompertz	2A401PW	2,4397 ^{NS}	0,9866	44	844,20	135,9848	141,3374
Hill	2A401PW	2,6818 ^{NS}	0,9884	44	830,80	137,2808	144,4175
Gompertz	AL Bandeirante	2,0796 ^{NS}	0,9167	36	5071,40	184,1227	188,8733
Hill	AL Bandeirante	2,0751 ^{NS}	0,9131	36	5130,60	186,5405	192,8746
Gompertz	BRS 4103	1,6356 ^{NS}	0,9860	32	474,80	92,3090	96,7063
Hill	BRS 4103	1,6880 ^{NS}	0,9864	32	447,50	92,4141	98,2770
Soja							
Modelo	Cultivares	DW	R^2_{aj}	n	SQR	AIC	BIC
Gompertz	DS59716 IPRO	2,1493 ^{NS}	0,9416	36	3396,10	169,6871	174,4377
Hill	DS59716 IPRO	2,2158 ^{NS}	0,9429	36	3222,80	169,8015	176,1356
Gompertz	CD2737 RR	2,5184 ^{NS}	0,9724	36	1694,20	144,6521	149,4026
Hill	CD2737 RR	2,5254 ^{NS}	0,9719	36	1670,80	146,1514	152,4855
Gompertz	CD251 RR	1,9951 ^{NS}	0,9707	36	1614,00	142,9063	147,6568
Hill	CD251 RR	1,9476 ^{NS}	0,9702	36	1590,70	144,3828	150,7169
Gompertz	CD2820 IPRO	2,1237 ^{NS}	0,9417	48	4615,10	225,1626	230,7762
Hill	CD2820 IPRO	2,1450 ^{NS}	0,9404	48	4612,80	227,1387	234,6235
Gompertz	CD2857 RR	3,0751 ^{NS}	0,9635	48	3208,30	207,7102	213,3238
Hill	CD2857 RR	3,0994 ^{NS}	0,9629	48	3193,20	209,4837	216,9685

NS valores não significativos a 5% de probabilidade.

No entanto, a utilização do modelo de Gompertz não permite a determinação do T50 de forma direta como pode ser visto no trabalho de Calha, Moreira e Rocha (2008) em que os autores avaliaram a germinação de populações de *Alisma Plantago-Aquatica*; nos trabalhos de Joosen et al. (2010) e Montesinos-Navarro, Picó e Tonsor (2012) avaliando a germinação *Arabidopsis thaliana* e no trabalho de Neto et al. (2018) caracterizando família de genes da enzima superóxido dismutase

em sementes de mamona (*Ricinus communis* L.). Esses autores utilizaram modelos logísticos.

Apesar da curva de Gompertz não fornecer de maneira direta o T50 ela fornece outro parâmetro de interesse que pode ser utilizado para comparação de potencial fisiológico de sementes o T37 (tempo necessário para atingir 37% de germinação). O T37 corresponde ao parâmetro “C” da função de Gompertz (4), ou seja, é o ponto de inflexão e nesse ponto a germinação é aproximadamente 37% do valor máximo (FIALHO, 1999). O valor de 37% pode ser obtido pelo quociente de A/e (parâmetros da função de Gompertz), isto significa que o percentil T37 corresponde $(100 \times P \times 37)/100$ em que P é a proporção de sementes germinadas no final do experimento. Por exemplo, se P foi estimado em 0,76, significa que apenas 76% das sementes utilizadas no experimento germinaram, e se T37 foi estimado em 50 horas, isso implica em que 28% das sementes utilizadas no experimento germinaram.

O parâmetro “C” do modelo Gompertz pode ser de grande aplicabilidade nos estudos de curvas de crescimento em animais, é interpretado como precocidade na maturidade, ou seja, quanto menor o valor desse parâmetro mais rápido é o crescimento (ESPIGOLAN et al., 2013; ARRUDA et al., 2018; GHIASI; LUPI; MOKHTARI, 2018). Assim, observa-se que existe uma literatura robusta quanto à utilização desse parâmetro como indicativo de velocidade de crescimento. Todavia, mesmo o modelo de Gompertz sendo mais simples em relação à função Hill e apresentando melhor ajuste neste trabalho, questionamentos poderiam surgir quanto à capacidade de discriminação das cultivares utilizando o T37 em vez do T50.

Com o objetivo de verificar diferenças quanto à utilização dos parâmetros T37 e T50 procedeu-se com uma análise de variância dos parâmetros obtidos após o ajuste dos modelos de Gompertz e Hill para cada repetição por cultivar. Verificada a suposição de normalidade dos resíduos por meio do teste Shapiro-Wilk (modificado) (RAHMAN; GOVINDARAJULU, 1997) e a significância da análise de variância pelo teste F a 5% de probabilidade, observou-se que o T37 e T50 obtiveram os mesmos resultados de acordo com teste LSD de Fisher, a 5% de probabilidade (Tabela 2). Com esses resultados, validamos o uso do T37 como um novo parâmetro que pode ser utilizado para comparação do potencial fisiológico de sementes sendo mais robusto que o T50, uma vez que a curva de Gompertz apresentou melhor qualidade de ajuste.

Tabela 2 - Valores de T37 e T50 obtidos modelos de Gompertz e pelo modelo de Hill de quatro parâmetros, respectivamente.

Milho		
Cultivares	*T37	#T50
2A401PW	50,15 a	52,88 a
2B587 RR	48,32 a	52,00 a
AS 1633 PRO3	47,28 a	50,16 a
BRS 4103	34,22 b	37,47 b
AL Bandeirante	34,10 b	35,97 b
Soja		
Cultivares	*T37	#T50
CD2820 IPRO	48,47 a	50,97 a
DS59716 IPRO	32,27 b	35,06 b
CD2857 RR	29,83 bc	31,70 bc
CD251 RR	24,19 c	25,90 c
CD2737 RR	24,02 c	25,94 c

*T37 = tempo necessário para 37% das sementes germinarem; #T50 = tempo necessário para 50% das sementes germinarem; médias com letras comuns nas colunas não diferem pelo teste LSD de Fisher a 5% de probabilidade.

Com base no T37 (Tabela 2) as cultivares de milho com maior potencial fisiológico são BRS 4103 e AL Bandeirantes, enquanto a cultivar 2401PW necessita de 16 horas a mais para ter o mesmo percentual germinativo. Em relação às cultivares de soja os menores T37 foram observados para as cultivares CD251 RR e CD2737 RR indicando uma maior qualidade fisiológica, ao passo que a cultivar CD2820 IPRO foi considerada de menor desempenho, necessitando de 24 horas a mais para ter o mesmo percentual germinativo.

As diferenças observadas quanto à velocidade de germinação, podem ser devidas ao tempo gasto na restauração das organelas e dos tecidos danificados antes de iniciarem o desenvolvimento do eixo embrionário, durante o processo de germinação (VILLIERS, 1973; MATTHEWS et al., 2012). Segundo Villiers (1973) e Silva (2006) cultivares ou lotes de sementes com maior velocidade de germinação são considerados os mais vigorosos desde que sejam sem dormência, pois existe uma relação direta entre velocidade de germinação e vigor.

A ideia de velocidade de germinação está associada aos atuais conceitos de vigor de sementes, dentre os conceitos temos: “o vigor de sementes é a soma de todas as propriedades que determinam o potencial de emergência rápida e uniforme

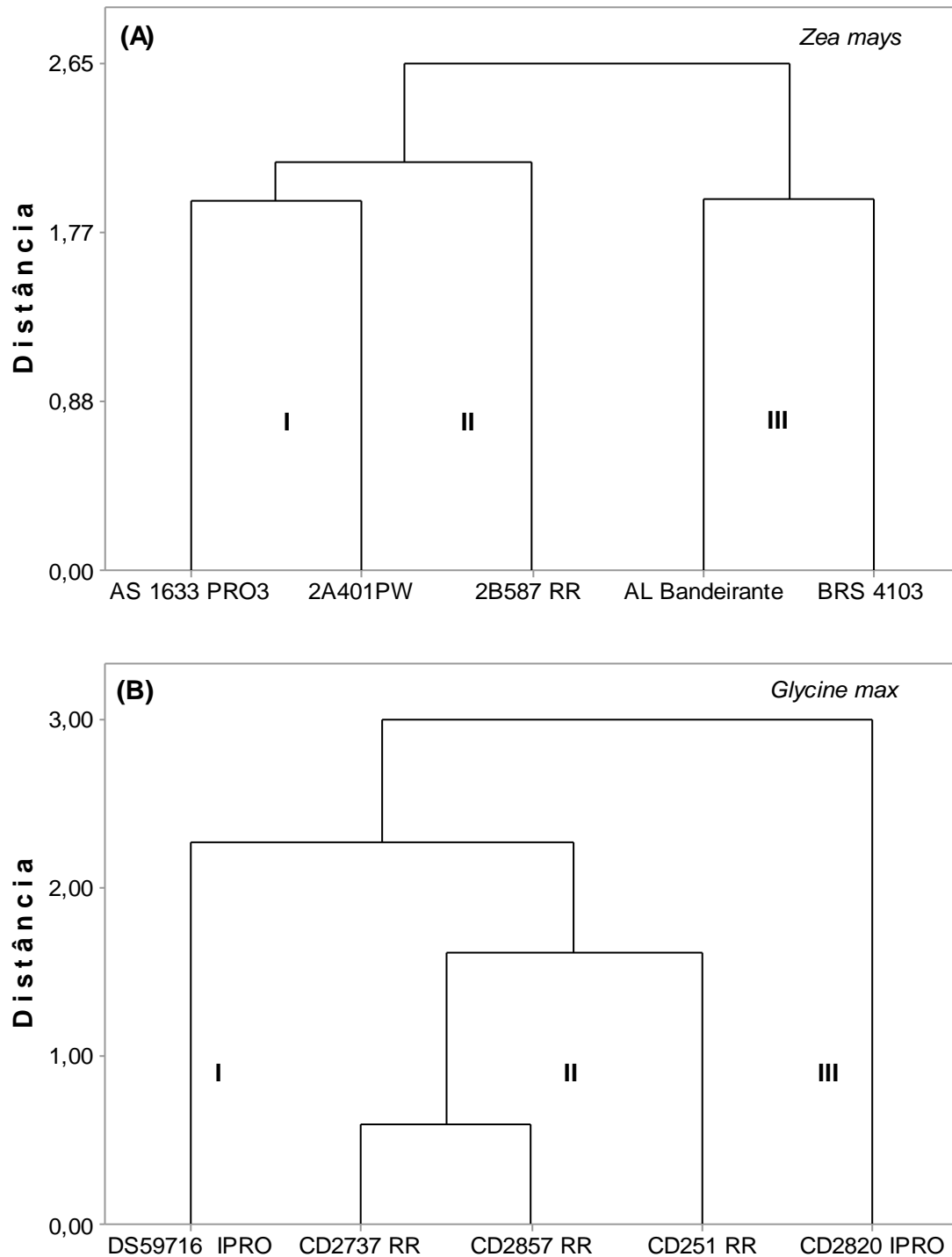
e o desenvolvimento de plântulas normais sob uma ampla gama de condições de campo” (AOSA, 1983; BAALBAKI et al., 2009). Dessa maneira, a utilização do T37 possui a mesma interpretação prática do T50 quanto à classificação dos lotes ou cultivares de sementes em relação ao vigor, ou seja, aqueles lotes com menores T37 são considerados os mais vigorosos.

Além da análise de variância sobre o parâmetro T37, realizou-se uma análise classificatória multivariada sobre os parâmetros obtidos das curvas médias, com o objetivo de compreender a germinação em um contexto global identificando as cultivares que apresentavam comportamento mais próximo. A utilização da análise multivariada para o agrupamento de curvas não lineares tem sido observada tanto na área animal como na área vegetal permitindo conclusões satisfatórias quanto ao agrupamento de curvas (SILVEIRA et al., 2011; LAURINDO et al., 2015)

Para as cultivares de milho e soja foi possível verificar a existência de três agrupamentos (Figura 1). Nas cultivares de milho as menores distâncias Euclidianas foram observadas entre as cultivares BRS 4103 e AL Bandeirantes e também entre as cultivares AS 1633 PRO3 e 2A 401PW com distância Euclidiana igual a 1,94 (Tabela 3), evidenciando que essas cultivares possuem curvas de germinação similares, enquanto as cultivares AS 1633 PRO3 e BRS 4103 apresentaram as curvas de germinação mais distantes, com distância Euclidiana igual 3,19 (Tabela 3).

Em relação à soja, as curvas de germinação mais próximas foram observadas para as cultivares CD2737 RR e CD2857 RR com distância Euclidiana igual a 0,59 (Tabela 3), já a maior distância foi observada entre as cultivares CD2820 IPRO e CD251 RR com distância igual a 3,72 (Tabela 3), ou seja, essas duas cultivares possuem grandes diferenças quanto ao potencial fisiológico. Assim, os resultados da análise multivariada corroboram com os resultados obtidos na Tabela 2, utilizando o T37 para as cultivares de milho e soja demonstrando a robustez desse parâmetro para seleção de cultivares de alta qualidade fisiológica de sementes.

Figura 1 - Dendograma obtido a partir dos parâmetros da curva média de Gompertz das cultivares de milho (A) e soja (B).



*I, II e III = grupos formados após a análise multivariada por meio da ligação média, utilizando a distância Euclidiana.

Tabela 3 - Distâncias Euclidianas entre as cultivares de milho e soja obtida a partir da ligação média.

Milho					
Cultivares	2A401PW	2B587 RR	AL Bandeirante	AS 1633 PRO3	BRS 4103
2A401PW	0	0	0	0	0
2B587 RR	2,18	0	0	0	0
AL Bandeirante	2,14	2,89	0	0	0
AS 1633 PRO3	1,94**	2,10	2,84	0	0
BRS 4103	2,87	1,99	1,94**	3,19 [#]	0

Soja					
Cultivares	CD251 RR	CD2737 RR	CD2820 IPRO	CD2857 RR	DS59716 IPRO
CD251 RR	0	0	0	0	0
CD2737 RR	1,46	0	0	0	0
CD2820 IPRO	3,72 [#]	3,27	0	0	0
CD2857 RR	1,78	0,59**	2,73	0	0
DS59716 IPRO	3,28	2,02	2,29	1,52	0

**Menor e [#] maior distância obtida.

Após a identificação do modelo de Gompertz como mais eficiente para descrever a germinação de sementes de milho e soja, além de validar o T37, outro interesse foi comparar dentre aquelas cultivares com menores distâncias Euclidianas as que possuem processo germinativo mais eficiente e também quais parâmetros comuns podem ser compartilhados pelas equações para um posterior estudo das derivadas de Gompertz. Para isso, utilizou-se a técnica de identidade de modelos, por ser a mais indicada para tal finalidade (REGAZZI 2003; SILVEIRA et al., 2011).

De acordo com o teste de identidade de modelos (Tabela 4), nota-se que houve diferença significativa entre todos os parâmetros para as cultivares de milho AS 1633 PRO3 e 2A 401PW, pois todas as hipóteses foram negadas ao nível de 5% de probabilidade, ou seja, não é possível ajustar equações com parâmetros comuns para as cultivares. A principal causa para rejeição das hipóteses foi a germinação máxima, uma vez que as diferenças ultrapassaram 16%, fato indicado pela maior soma de quadrados na hipótese $H_0^{(1)}$ quando se testou um parâmetro por vez (Apêndice A; Tabela 12).

Para as cultivares AL Bandeirantes e BRS 4103, as hipóteses $H_0^{(1)}$, $H_0^{(3)}$ e $H_0^{(5)}$ foram aceitas, dessa maneira, podemos considerar que essas cultivares possuem as germinações finais iguais estatisticamente ficando em torno de 100% (Apêndice A;

Tabela 13), o mesmo ponto de inflexão (T37) e podem ser representadas por uma equação com os parâmetros comuns (“A” e “C”) para a máxima germinação e ponto de inflexão, no entanto, não foi possível ajustar uma equação que englobasse todos os parâmetros para ambas as cultivares, pois a germinação relativa no ponto de inflexão foi diferente, o que pode ser observado pela rejeição da hipótese $H_0^{(2)}$. A maior germinação relativa foi observada para a cultivar AL Bandeirantes com 0,18%/hora por %G indicando maior qualidade fisiológica, considerando o ajuste fornecido pela hipótese $H_0^{(5)}$ (Apêndice A; Tabela 13).

Tabela 4 - Teste de identidade de modelos para as cultivares de milho e soja com menores distâncias Euclidianas tendo em vista os parâmetros da função Gompertz.

AS 1633 PRO3 / 2A 401PW				
Hipóteses	$\chi^2_{calc.}$	GL_v	$P(\chi^2_v > \chi^2_{calc.})$	Decisão
$H_0^{(1)}$: $A_1 = A_2 = A$	32,72651	1	<0,0001	Rejeita
$H_0^{(2)}$: $B_1 = B_2 = B$	4,197578	1	0,0400	Rejeita
$H_0^{(3)}$: $C_1 = C_2 = C$	24,93738	1	<0,0001	Rejeita
$H_0^{(4)}$: $A_1 = A_2 = A; B_1 = B_1 = B$	42,12999	2	<0,0001	Rejeita
$H_0^{(5)}$: $A_1 = A_2 = A; C_1 = C_2 = C$	35,08883	2	<0,0001	Rejeita
$H_0^{(6)}$: $B_1 = B_2 = B; C_1 = C_2 = C$	27,65425	2	<0,0001	Rejeita
$H_0^{(7)}$: $A_1 = A_2 = A; B_1 = B_2 = B$ e $C_1 = C_2 = C$	43,67089	3	<0,0001	Rejeita
AL Bandeirante / BRS 4103				
Hipóteses	$\chi^2_{calc.}$	GL_v	$P(\chi^2_v > \chi^2_{calc.})$	Decisão
$H_0^{(1)}$: $A_1 = A_2 = A$	2,3233	1	0,1275	Aceita
$H_0^{(2)}$: $B_1 = B_2 = B$	6,5291	1	0,0106	Rejeita
$H_0^{(3)}$: $C_1 = C_2 = C$	1,9028	1	0,1678	Aceita
$H_0^{(4)}$: $A_1 = A_2 = A; B_1 = B_1 = B$	6,8120	2	0,0332	Rejeita
$H_0^{(5)}$: $A_1 = A_2 = A; C_1 = C_2 = C$	2,7702	2	0,2503	Aceita
$H_0^{(6)}$: $B_1 = B_2 = B; C_1 = C_2 = C$	7,4275	2	0,0244	Rejeita
$H_0^{(7)}$: $A_1 = A_2 = A; B_1 = B_2 = B$ e $C_1 = C_2 = C$	9,1570	3	0,0273	Rejeita
CD2737 RR / CD2857 RR				
Hipóteses	$\chi^2_{calc.}$	GL_v	$P(\chi^2_v > \chi^2_{calc.})$	Decisão
$H_0^{(1)}$: $A_1 = A_2 = A$	0,449358	1	0,50264	Aceita
$H_0^{(2)}$: $B_1 = B_2 = B$	5,348539	1	0,02074	Rejeita
$H_0^{(3)}$: $C_1 = C_2 = C$	72,67348	1	<0,0001	Rejeita
$H_0^{(4)}$: $A_1 = A_2 = A; B_1 = B_1 = B$	5,696139	2	0,057956	Aceita
$H_0^{(5)}$: $A_1 = A_2 = A; C_1 = C_2 = C$	74,35768	2	<0,0001	Rejeita
$H_0^{(6)}$: $B_1 = B_2 = B; C_1 = C_2 = C$	73,99557	2	<0,0001	Rejeita
$H_0^{(7)}$: $A_1 = A_2 = A; B_1 = B_2 = B$ e $C_1 = C_2 = C$	78,80826	3	<0,0001	Rejeita

Em relação às cultivares de soja CD2737 RR e CD2857 RR de acordo com teste de identidade, as hipóteses $H_0^{(1)}$ e $H_0^{(4)}$ foram aceitas indicando que essas cultivares possuem germinação máxima iguais estatisticamente (Apêndice A; Tabela 14) e podem ser representadas por uma equação comum que compartilhe a mesma germinação final e germinação relativa no ponto de inflexão.

Demostrou-se por meio do teste de identidade de modelos desenvolvidos por Regazzi (2003) que as curvas de germinação das cultivares de milho e soja que apresentaram as menores distâncias Euclidianas por mais que sejam próximas não podem ser consideradas iguais estatisticamente. Dessa maneira, o agrupamento de curvas e o teste de identidade de modelos constituem estudos complementares para a avaliação de qualidade fisiológica de sementes.

Para um maior detalhamento da qualidade fisiológica de sementes de milho e soja calculou-se a partir das derivadas da curva de Gompertz: a taxa de germinação relativa (TGR); a aceleração da germinação (ACG) e a taxa de germinação (TG). Essas derivadas foram calculadas a partir dos parâmetros da curva de Gompertz apresentados na Tabela 5.

A TGR é definida como a taxa de germinação dividida pela porcentagem de germinação. O valor da TGR decai ao longo do processo de germinação formando uma equação exponencial negativa como pode ser visto na Figura 2 para as 10 cultivares estudadas. Quando a porcentagem de germinação se aproxima de 37% a TGR é igual ao parâmetro "B". Em outras palavras, "B" é a taxa de germinação relativa no ponto de inflexão (T37). Por exemplo, a cultivar de milho AS 1633 PRO3 chega a uma taxa máxima de germinação 4,10%/hora aos 28,28% de germinação, o valor de "B" é igual a aproximadamente 0,14.

A utilização prática da TGR para avaliar qualidade fisiológica de sementes pode ser feito observando a cinética de decaimento, sendo que aquelas cultivares que se aproximarem de zero mais rápido possuem uma maior velocidade de germinação, pois quando as cultivares se aproximam do máximo potencial de germinação a taxa, absoluta de germinação também se aproxima de zero.

Tabela 5 - Parâmetros da curva de Gompertz para as cultivares de milho e soja.

Milho			
Cultivares	A	B	C (T37)
AS 1633 PRO3	76,8870	0,1451	47,0231
2B587 RR	96,2612	0,1017	48,4182
2A401PW	93,4759	0,1897	50,5336
AL Bandeirante**	100,0000	0,1789	33,5705
BRS 4103 **	100,0000	0,1300	33,5705
Soja			
Cultivares	A	B	C (T37)
DS59716 IPRO	100,0000	0,1396	31,8827
CD2737 RR**	98,4600	0,1931	23,8800
CD251 RR	91,8471	0,2231	24,2389
CD2820 IPRO	98,2036	0,0844	47,5640
CD2857 RR**	98,4600	0,1931	29,6900

** Equações ajustadas pelo teste de identidade de modelos proposto por Regazzi (2003).

Considerando a TGR, observa-se que as cultivares de milho BRS 4103 e AL Bandeirantes se aproximam de zero mais rapidamente que as demais cultivares (Figura 2). Já a cultivar 2B587 RR, embora possua mais de 96% de capacidade germinativa prevista pelo modelo (Tabela 5) leva mais tempo para atingir zero indicando a menor qualidade fisiológica. Já as cultivares de soja CD251 RR e CD2737 RR, possuem maior velocidade para atingir TGR igual a zero, enquanto a cultivar CD2820 IPRO apresenta menor velocidade para atingir o valor de zero.

Como pode ser visto na Figura 2, a ACG em termos absolutos indica que aceleração inicial da germinação é maior do que a desaceleração após o ponto de inflexão. Em termos matemáticos, isso ocorre porque a ACG é a variação da porcentagem da taxa de germinação ao longo do tempo. A descrição do comportamento da aceleração da germinação corrobora com o fenômeno biológico da germinação, pois segundo Bewley et al. (2013), a germinação das primeiras sementes é mais rápida que das últimas.

Traduzindo o comportamento da ACG vemos claramente que no início do processo de germinação a aceleração é nula, pois as sementes estão nas fases I e II da embebição, onde ocorre absorção de água pelas sementes até atingir um platô culminando com a germinação (protrusão) no fim da fase II (BEWLEY; BLACK, 1978; BRADFORD, 1990). Após as sementes atingirem um platô de absorção de água a porcentagem de germinação acelera até atingir o valor máximo, no entanto, a

partir do T37 que representa o ponto de inflexão ocorre uma mudança de comportamento, a ACG se torna negativa, pois o incremento de sementes germinadas é menor que no início, até o ponto onde a máxima capacidade germinativa é alcançada.

Com base na ACG podemos definir o início, os intervalos de maior e menor frequência e o momento de encerramento do processo de germinação. Por exemplo, analisando a cultivar de milho AL Bandeirantes, observamos que o processo de germinação tem início com aproximadamente 20 h, o intervalo de maior frequência de germinação ficou entre 20 e 35 h, o intervalo de menor frequência de germinação ficou entre 35 e 60 h e finalmente, encerrando o processo de germinação entre 60 e 70 h (Figura 2). Dessa maneira, o cálculo da ACG permitiu o estudo detalhado da germinação.

A taxa de germinação é obtida a partir da primeira derivada do modelo Gompertz em relação ao tempo, que significa o aumento da porcentagem de germinação acumulada por unidade de tempo, nesse caso seria o aumento médio da porcentagem acumulada por hora, já que o tempo é dado em horas. A taxa de germinação de um lote pode ser obtida de maneira direta pela utilização da seguinte fórmula:

$$TG = \frac{A \times B}{e} \quad (8)$$

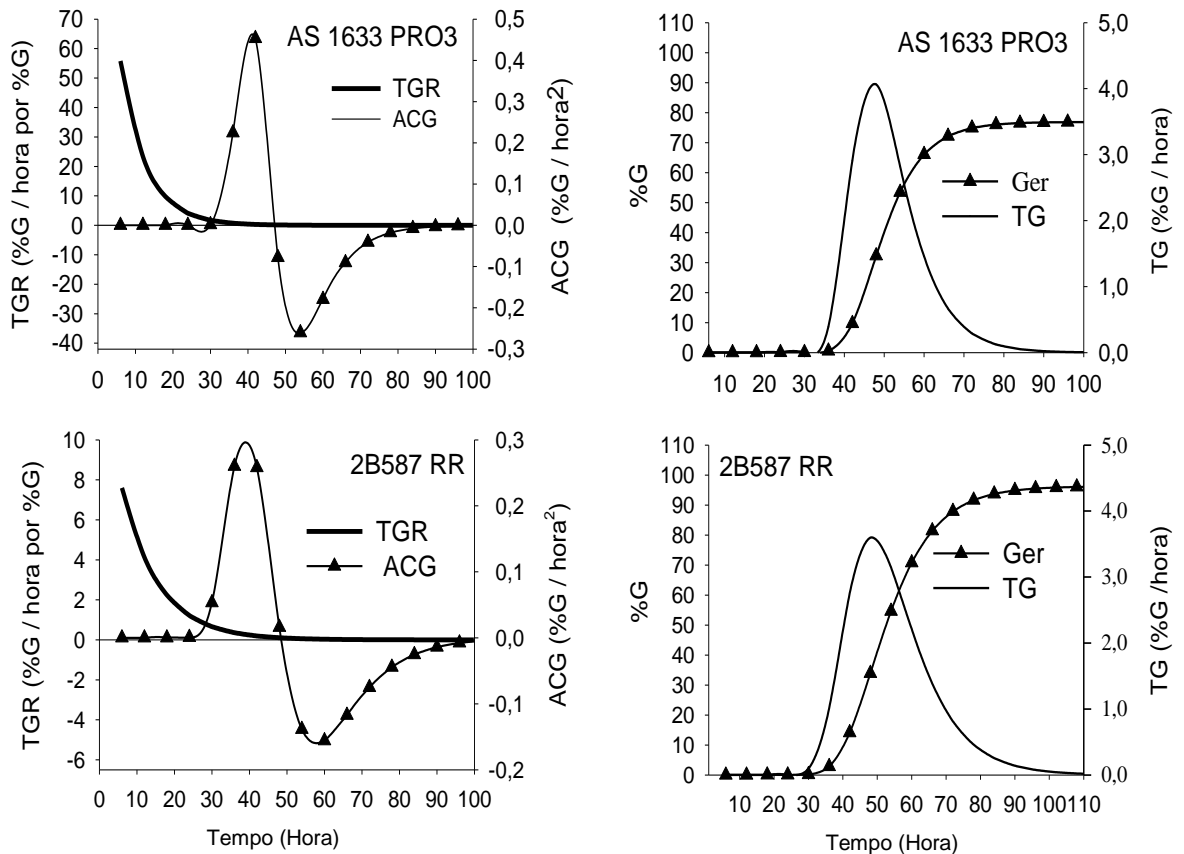
em que A e B são parâmetros da curva de Gompertz e “e” a base do logaritmo neperiano.

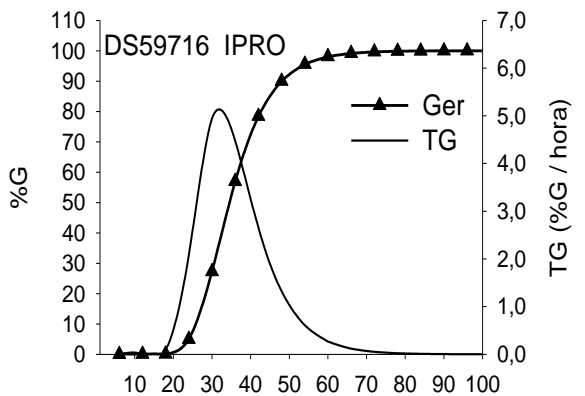
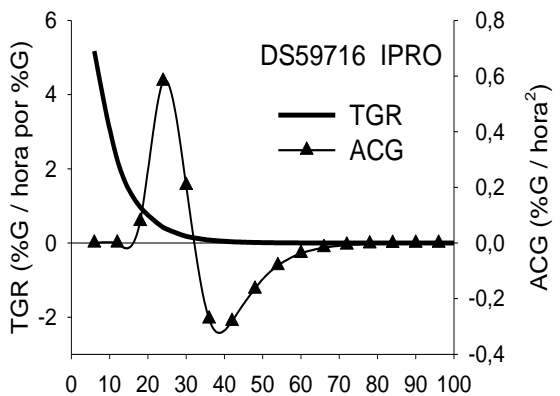
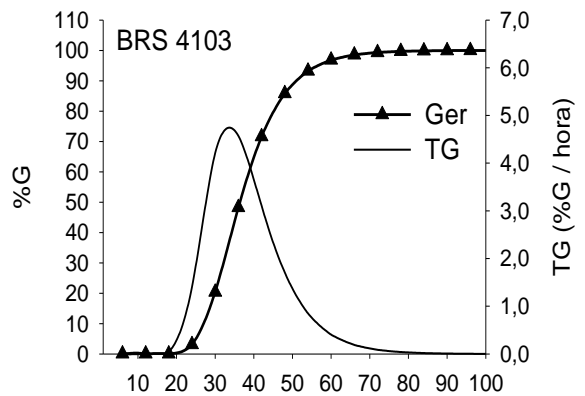
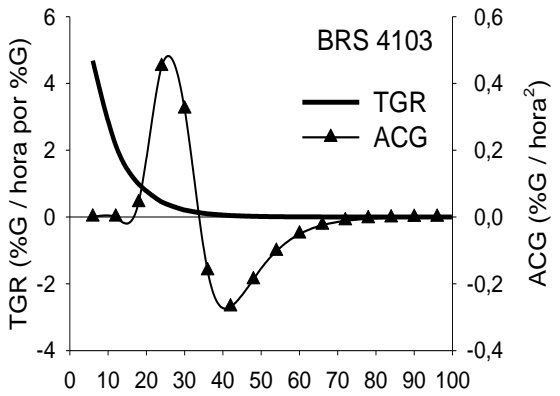
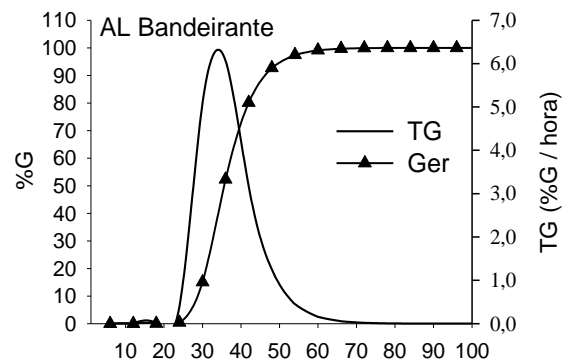
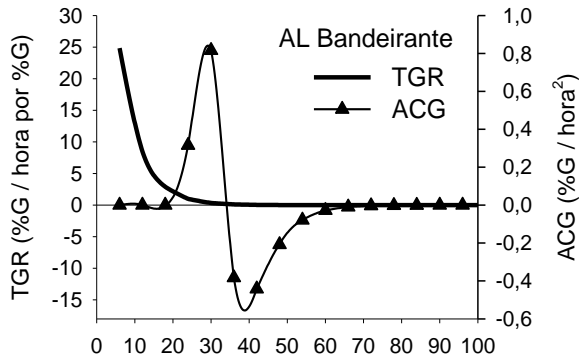
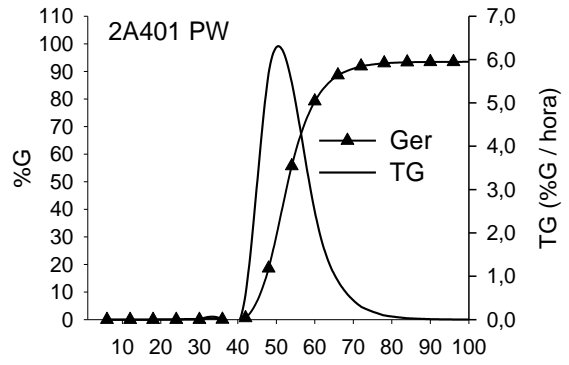
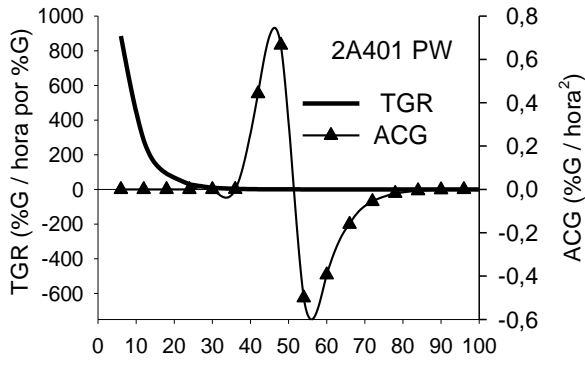
Assim, as maiores taxas de germinação foram observadas para as cultivares de milho 2A401PW, AL Bandeirante e BRS 4103. Enquanto que para soja, as cultivares CD2857 RR, CD251 RR e CD2737 RR obtiveram as maiores taxas (Figura 2). No entanto, não podemos utilizar a taxa de germinação de forma isolada para caracterizar a qualidade fisiológica de sementes, pois os valores do parâmetro “B” da função de Gompertz estão intimamente ligados ao T37, ou seja, para julgar qual população de semente é mais vigorosa devemos primeiramente observar qual lote possui o menor T37.

A determinação da taxa de germinação pode ser útil nos casos em que as capacidades germinativas e T37 são iguais estatisticamente, como demonstrado nas

tabelas 4 e 5 para as cultivares de milho BRS 4103 e AL Bandeirantes. Assim, o cálculo da taxa de germinação é capaz de informar qual cultivar é mais vigorosa ou de germinação mais precoce. Calculando as taxas de germinação pela expressão (8) observa-se que as taxas de germinação das cultivares BRS 4103 e AL Bandeirantes são iguais em termos absolutos a 4,78 e 6,58, respectivamente. Assim, considera-se AL Bandeirante como sendo a mais vigorosa. A importância da utilização da taxa de germinação também é relatada em outros trabalhos (CALHA; MOREIRA; ROCHA, 2008; SOUSA et al., 2014).

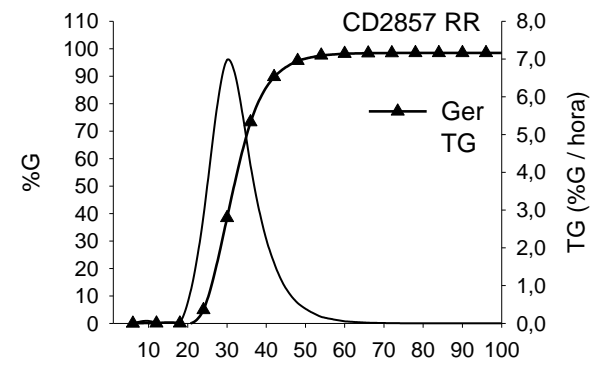
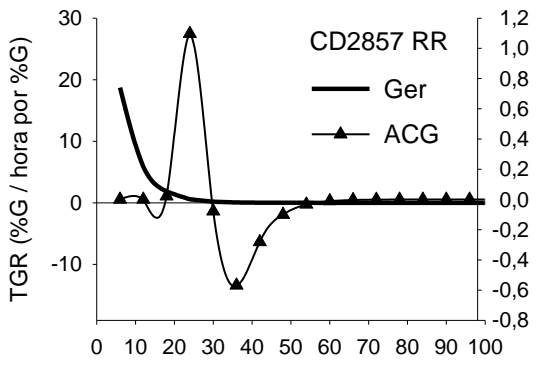
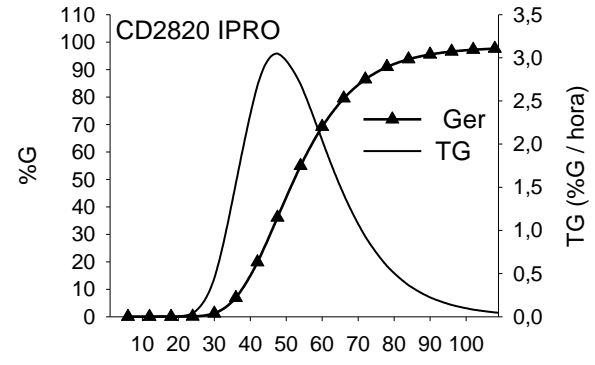
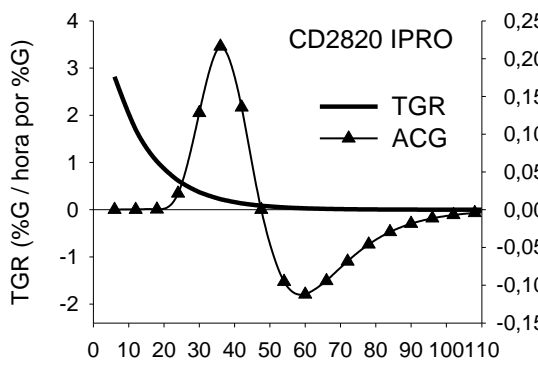
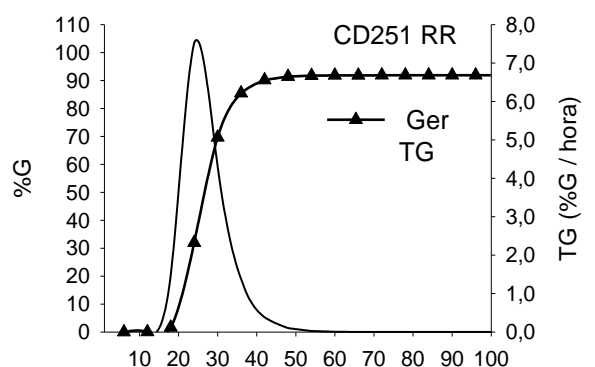
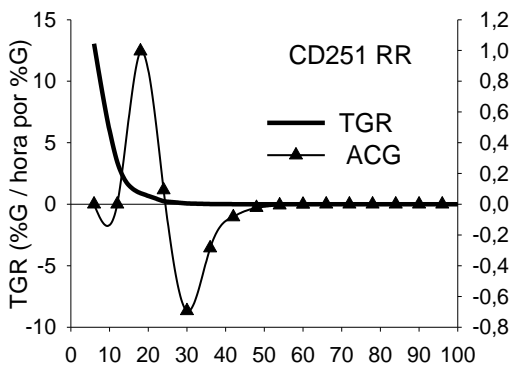
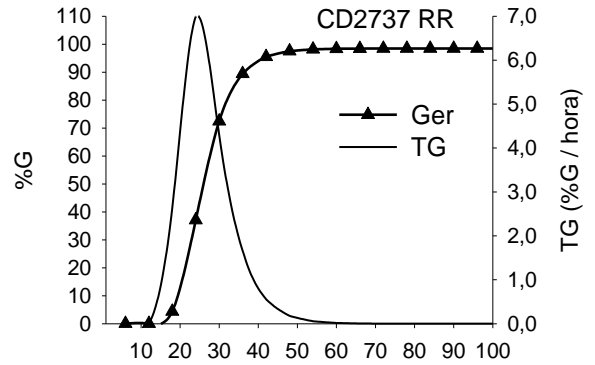
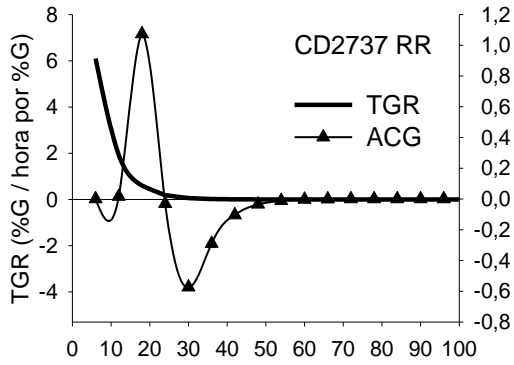
Figura 2 - Características germinativas das cultivares de milho e soja avaliadas pela função Gompertz, taxa de germinação relativa (TGR), aceleração da germinação (ACG), taxa de germinação (TG) e germinação predita (Ger).





Tempo (hora)

Tempo (hora)



De maneira geral, observando o T37, a TGR, a ACG e a TG podemos elencar as cultivares de milho AL Bandeirante e BRS 4103 e as cultivares de soja CD251 RR e CD2737 RR como aquelas que apresentam maior qualidade fisiológica de sementes. O baixo desempenho das demais cultivares em relação a essas pode ser explicado pelo processo de deterioração, uma vez que reduz as atividades respiratórias e biossintéticas devido à degradação das membranas celulares, reduzindo a germinação e desencadeando uma maior sensibilidade às condições ambientais (DELOUCHE; BASKIN, 1973).

1.4 CONCLUSÕES

A metodologia proposta para utilização do modelo de Gompertz na avaliação da germinação e qualidade fisiológica de sementes de milho e soja mostrou-se adequada para classificar as cultivares quanto ao potencial fisiológico de sementes. O uso do T37 e das derivadas do modelo de Gompertz forneceram uma descrição precisa e detalhada sobre a qualidade fisiológica e o processo de germinação. De acordo com a metodologia apresentada, as cultivares de milho AL Bandeirante e BRS 4103 e as cultivares de soja CD251 RR e CD2737 RR foram consideradas as mais vigorosas.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico “CNPq”, pela bolsa de estudos concedida. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo “FAPESP”, pelo auxílio pesquisa, processo n° 2016/13126-0.

REFERÊNCIAS

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

ARRUDA, R. M. S.; SOUZA, J. C.; JARDIM, R. J. D.; FERRAZ-FILHO, P.; SILVA, L. O. C. Growth curves and nutritional requirements for maintenance of asymptotic weight of Nellore cattle. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 4, p. 692-698, 2018.

ASSOCIATION OF OFFICIAL SEED ANALYSTS – AOSA. **Seed vigor testing handbook.** East Lansing: AOSA, 1983. 93p.

BAALBAKI, R.; ELIAS, S.; MARCOS FILHO, J.; MCDONALD, M. B. 2009. Seed vigor testing handbook, AOSA, Ithaca, NY, USA. **Contribution to the Handbook on Seed Testing**, v. 32, 2009.

BELMONT, J.; SÁNCHEZ-CORONADO, M. E.; OSUNA-FERNÁNDEZ, H. R. OROZCO-SEGOVIA, A.; PISANTY, I. Priming effects on seed germination of two perennial herb species in a disturbed lava field in central Mexico. **Seed Science Research**, v.28, n.1, p.63-71, 2018.

BEWLEY, J. D.; BLACK, M. **Physiology and Biochemistry of Seeds: In Relation to Germination**. New York, Springer-verlag, 1978, 306 p.

BEWLEY, J. D.; BRADFORD, K. J.; HILHORST, H. W. M.; AND NONOGAKI, H. **Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy**. 3. ed. New York, NY: Springer, 2013. 407 p.

BRADFORD, K. J. A water relations analysis of seed germination rates. **Plant Physiology**, v. 94, n. 2, p. 840-849, 1990.

CALHA, I.; MOREIRA, I.; ROCHA, F. Germinação de sementes de populações de orelha-de-mula (*Alisma Plantago-Aquatica*) resistentes e susceptíveis ao bensenfuração-metilo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 31, n. 1, p. 117-130, 2008.

COPELAND, L. O.; MCDONALD, M. B. **Principles of seed science and technology**. 3. ed. New York: Chapman & Hall, 1995. 409 p.

DE BEM, C. M.; CARGNELUTTI FILHO, A.; CHAVES, G. G.; KLEINPAUL, J. A.; PEZZINI, R. V.; LAVEZO, A. Gompertz and Logistic Models to the Productive Traits of Sunn Hemp. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 1, p. 225, 2017.

DELOUCHE, J. C.; BASKIN, C. C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seeds lots. **Seed Science and Technology**, v. 1, n. 2, p. 427-452, 1973.

DINIZ, F. O.; REIS, M. S.; DIAS, L. A. S.; ARAÚJO, E. F.; SEDIYAMA, T.; SEDIYAMA, C. A. Physiological quality of soybean seeds of cultivars submitted to

harvesting delay and its association with seedling emergence in the field. **Journal of Seed Science**, v. 35, n. 2, p.147-152, 2013.

EL-KASSABY, Y. A.; MOSS, I.; KOLOTELO, D.; STOEHR, M. Seed germination: Mathematical representation and parameters extraction. **Forest Science**, v. 54, n. 2, p. 220-227, 2008.

EMILIANO, P. C.; VIVANCO, M. J. F.; MENEZES, F. S. Information criteria: how do they behave in different models? **Computational Statistics & Data Analysis**, Cambridge, v. 69, p. 141-153, 2014.

ESPILGOLAN, R.; BALDI, F.; BOLIGON, A. A.; BANCHERO, G.; BRITO, G.; MANNA, A. L.; MONTOSI, F. FERNANDEZ, E.; ALBUQUERQUE, L. G. Aplicação de modelos não-lineares para descrever a evolução de características de crescimento e carcaça em bovinos da raça Hereford. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p.513-519, 2013.

FIGUEIREDO FILHO, L. A. S.; SARMENTO, J. L. R.; CAMPELO, J. E. G.; SANTOS, N. P. S.; SOUSA, J. E. R.; BIAGIOTTI, D. Fatores ambientais e genéticos sobre a curva de crescimento de caprinos mestiços. **Comunicata Scientiae**, v. 3, n. 3, p. 154-161, 2012.

FERNANDES, C. J.; PEREIRA, A. A.; MUNIZ, J. A. Double sigmoidal models describing the growth of coffee berries. **Ciência Rural**, v. 47, n. 8, 2017.

FIALHO, F. B. Interpretação da curva de crescimento de Gompertz. **Embrapa Suínos e Aves**, p. 1- 4, 1999.

GASPAR-OLIVEIRA, C. M.; MARTINS, C. C.; NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C. Duração do teste de germinação de *Brachiaria brizantha* cv. marandu (Hochst. ex A. Rich.) Stapf. **Revista brasileira de sementes**, v. 30, n. 3 p. 30-38, 2008.

GHIASI, H.; LUPI, T. M.; MOKHTARI, M. S. The estimation of genetic parameters for growth curve traits in Raeini Cashmere goat described by Gompertz model. **Small Ruminant Research**, v. 165, p.66-70, 2018.

JOOSEN, R. V. L.; KODDE, J.; WILLEMS, L. A. J.; LIGTERINK, W.; VAN DER PLAS, L. H. W.; HILHORST, H. W. M. Germinator: A software package for high-throughput scoring and curve fitting of *Arabidopsis* seed germination. **The Plant Journal**, v. 62, n. 1, p. 148-159, 2010.

LAURINDO, B. S.; LAURINDO, R. D. F.; AZEVEDO, A. M.; NICK, C.; SILVA, D. J. H.; MIZUBUTI, E. S. G. Seleção de acessos de tomateiro resistentes à pinta-preta pela análise de agrupamento das curvas de progresso da doença. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 106-114, 2015.

MATTHEWS, S.; NOLI, E.; DEMIR, I.; KHAJEH-HOSSEINI, M. M.-H. Wagner Evaluation of seed quality: from physiology to international standardization. **Seed Science Research**, v. 22, n. S1, p. S69-S73, 2012.

MARCOS-FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v.72, n.4, p.363-374, 2015.

MONTESINOS-NAVARRO, A.; PICÓ, F. X.; TONSOR, S. J. Clinal variation in seed traits influencing life cycle timing in *Arabidopsis thaliana*. **Evolution: International Journal of Organic Evolution**, v. 66, n. 11, p. 3417-3431, 2012.

NETO, V. G.; RIBEIROA, P. R.; DEL-BEMA, L. E.; BERNAL, D. T.; LIMA, C. S. T.; LIGTERINKE, W.; FERNANDEZ, L. G.; CASTRO, R. D. Characterization of the superoxide dismutase gene family in seeds of two *Ricinus communis* L. genotypes submitted to germination under water restriction conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 155, p.453-463, 2018.

ONOFRI, A.; GRESTA, F.; TEI, F. A new method for the analysis of germination and emergence data of weed species. **Weed Research**, v. 50, n.3, p. 187-198, 2010.

RAHMAN, M. M.; GOVINDARAJULU, Z. A modification of the test of Shapiro and Wilk for normality. **Journal of Applied Statistics**, v. 24, n. 2, p. 219-236, 1997.

RATKOWSKY, D. A. **Modelagem de regressão não-linear: Uma abordagem prática unificada**. Nova Iorque, Marcel Dekker, 1983. 276p.

REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. **Revista Ceres**, v. 50, n. 287, p.9-26, 2003.

RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. 1.ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 362 p.

RIBEIRO, T. D.; MATTOS, R. W. P.; MORAIS, A. R.; MUNIZ, J. A. Description of the growth of pequi fruits by nonlinear models. **Revista Brasileira Fruticultura Jaboticabal**, v. 40, n. 4, 2018.

RITZ, C.; PIPPER, C. B.; STREIBIG, J. C. Analysis of germination data from agricultural experiments. **European Journal of Agronomy**, v. 45, p. 1-6, 2013.

SARI, B. G.; LÚCIO, A. D. C.; SANTANA, C. S.; SAVIAN, T. V. Describing tomato plant production using growth models. **Scientia Horticulturae**, v. 246, p. 146-154, 2019.

SAVIN, N.; E WHITE, K. J. (1977). The Durbin-Watson test for serial correlation with extreme sample sizes or many regressors. **Econometrica**, v. 45, n. 08, p. 1989-1996.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **The annals of statistics**, v. 6, n. 2, p.461-464, 1978.

SILVA, A. R.; DIAS, C. T. S. A cophenetic correlation coefficient for Tocher's method. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.48, n.6, p.589-596, 2013.

SILVA, N. O. **Controle genético de características associadas à qualidade de sementes de milho**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras: UFLA, 2006, 92 p.

SILVEIRA, F. G.; FONSECA, F.; CARNEIRO, S. P. L. S.; MALHADO, C. H. M.; MUNIZ, J. A. Análise de agrupamento na seleção de modelos de regressão não-lineares para curvas de crescimento de ovinos cruzados. **Ciência Rural**, v. 41, n. 4, p. 692-698, 2011.

SOUSA, I. F.; KUNZLE NETO, E J.; MUNIZ, J. A.; GUIMARÃES, R. M.; SAVIAN, V. T.; MUNIZ, F. R. Fitting nonlinear autoregressive models to describe coffee seed germination. **Ciência Rural**, v. 44, n. 11, p. 2016-2021, 2014.

VILLIERS, T. A. **Ageing and longevity of seeds infield conditions.** In: HEYDECKER, W. (Ed.). *Seed ecology*. London: The Pennsylvania State University, 1973. p.265-288.

CAPÍTULO 2

ABORDAGEM GENERALIZADA PARA MODELAR A GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE MILHO E SOJA

RESUMO

A utilização de sementes de alto potencial fisiológico garante o crescimento e desenvolvimento das plantas e o eventual rendimento das culturas, sendo de suma importância que os melhores lotes e/ou cultivares sejam selecionados. Diante do exposto, é de grande relevância a precisão das informações geradas a partir das análises estatísticas, uma vez que condicionam as decisões. Assim os modelos lineares generalizados podem ser uma alternativa, pois oferecem conclusões robustas para dados obtidos na forma de proporções. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar os parâmetros da germinação de sementes de milho e soja obtidos por modelos lineares generalizados, investigando qual função de ligação, Probit, Logit ou Complemento Log Log, é a mais adequada para prever o potencial fisiológico. Para isso, avaliou-se a germinação de 20 sementes com quatro repetições por meio do teste de emissão da raiz primária (protrusão) de 10 cultivares, sendo cinco de milho e cinco de soja, os resultados foram expressos na forma de proporções. O melhor modelo por cultivar foi eleito conforme os critérios: teste da *Deviance*, AIC e BIC. Os parâmetros de germinação foram calculados pelos modelos selecionados. Observou-se que o modelo Logit foi o que apresentou melhores resultados para maioria das cultivares. Os modelos lineares generalizados possibilitaram a estimativa de qualquer tempo de germinação e uniformidade, obtendo os menores valores para as cultivares AL Bandeirante, BRS 4103, CD251 RR e CD2737 RR. A avaliação da germinação na forma de proporções considerando a pressuposição de resposta binomial é satisfatória, sendo que a escolha da função de ligação é dependente das características de cada lote e espécie avaliada.

Palavras-chave: Qualidade fisiológica. Vigor. *Zea mays* L. *Glycine max* (L.) Merrill. Funções de ligação.

GENERALIZED APPROACH TO MODELING THE GERMINATION OF CORN AND SOYBEAN SEEDS

ABSTRACT

The use of seeds of high physiological potential guarantees the growth and development of the plants and the eventual yield of the crops, being of great importance that the best lots and/or cultivars be selected. In view of what has been demonstrated, the accuracy of the information generated from the statistical analysis is of great relevance since it determines the decisions. Thus generalized linear models can be an alternative, since they offer robust conclusions for data obtained in the form of proportions. In this context, the objective of this work was to evaluate the parameters of germination of corn and soybean seeds obtained by generalized linear models, investigating which linking function Probit, Logit or Log log Complement, will be adequate to predict the physiological potential. For this, the germination of 20 seeds with four replicates was evaluated through the primary root emission test (protrusion) of 10 cultivars, five of them were of corn and five of soybean, the results were expressed as proportions. The best model by cultivar was chosen according to the criteria: Deviance test, AIC and BIC. The germination parameters were calculated by the selected models. It was observed that the Logit model presented the best results for most of the cultivars. The generalized linear models allowed the estimation of any germination and uniformity time, obtaining the lowest values for the cultivars AL Bandeirante, BRS 4103, CD251 RR and CD2737 RR. The evaluation of the germination in the form of proportions considering the presupposition of binomial response is satisfactory, and the choice of the link function is dependent on the characteristics of each batch and species evaluated.

Keywords: Physiological quality. Vigour. *Zea mays* L. *Glycine max* (L.) Merrill. Link functions.

2.1 INTRODUÇÃO

A safra brasileira de grãos estimada para o ano de 2018/19 gira em torno de 238 milhões de toneladas segundo a Companhia Nacional do Abastecimento, sendo as culturas do milho (*Zea mays* L.) e da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) responsáveis por quase 90% da produção (BRASIL, 2018). A expressividade da produção brasileira de grãos é o resultado da soma de vários fatores, dentre eles, o uso de sementes de alta qualidade.

Entende-se como qualidade de sementes a soma de quatro características básicas, que abrangem o potencial genético, fisiológico, físico e sanitário (MARCOS-FILHO, 2015). Das características mais estudadas na indústria de sementes e bancos de germoplasma, destaca-se o potencial fisiológico, pois sementes de alto potencial garantem o crescimento e desenvolvimento das plantas e o eventual rendimento das culturas (FRANÇA NETO et al., 2010; MARCOS FILHO, 2015; PIZÁ et al., 2018).

Assim, a correta identificação de lotes e/ou cultivares com sementes de alto potencial fisiológico é uma das principais tarefas dos profissionais ligados à área de sementes. Para isso, são levados em consideração dois fatores, a germinação (viabilidade) e vigor, sendo que esses fatores governam a capacidade teórica das sementes em expressar suas funções vitais sob condições ambientais favoráveis e desfavoráveis (AOSA, 1983; BAALBAKI et al., 2009).

A principal forma de monitorar/avaliar a qualidade fisiológica de um lote de sementes é por meio da capacidade de germinar (DINIZ et al., 2013; MARCOS FILHO, 2015). Em função disso, são conduzidos ensaios em que são avaliados parâmetros como, o tempo para 50% das sementes utilizadas germinarem (T50), a uniformidade de germinação, que é a diferença de tempo entre duas germinações pré-definidas, germinação máxima e outros parâmetros de acordo com o interesse do pesquisador (JOOSEN et al., 2010; MATTHEWS et al., 2012; HATZIG et al., 2015; NETO et al., 2018).

Diante da necessidade de avaliar qual lote ou cultivar possui maior qualidade fisiológica a variável resposta, proporção de sementes germinadas, é comumente avaliada por regressões não lineares, como por exemplo, a função de Hill (EL-KASSABY et al., 2008; JOOSEN et al., 2010; NETO et al., 2018). Outra maneira

também empregada para analisar os dados de germinação é por meio de linearizações, em que uma função de ligação é utilizada, destacando-se a função de Probit como a mais usada (ELLIS; ROBERTS, 1980; HAY; MEAD; BLOOMBERG, 2014; DAIBES; CARDOSO, 2018). Essas abordagens, no entanto, são problemáticas, pois consideram a variável resposta como contínuas: no primeiro caso, as proporções de sementes germinadas são acumulativas podendo ocorrer autocorrelação residual (ONOFRI; GRESTA; TEI, 2010), enquanto que, no segundo caso as porcentagens de germinação são transformadas em unidades Probit, considerando que os dados seguem distribuição normal, o que acaba gerando modelos imprecisos ou simplesmente a falta de linearização (GAZOLA et al., 2011; DAIBES E CARDOSO, 2018).

Como o processo de germinação é basicamente qualitativo, com um resultado binário, ou seja, a semente germina ou não germina e, portanto, os erros não são normalmente distribuídos, a abordagem clássica de análise de regressão não é indicada (ONOFRI; GRESTA; TEI, 2010). Uma alternativa para análise desse tipo de dado é a teoria dos modelos lineares generalizados, sendo a distribuição binomial, um caso particular e indicada para dados de proporção (MCCULLAGH; NELDER, 1989; HAY; MEAD; BLOOMBERG, 2014; MURPHEY et al., 2015). Dentre os possíveis modelos que podem ser propostos, existe a preocupação de selecionar aquele que forneça as informações mais precisas acerca do problema exposto (EMILIANO; VIVANCO; MENEZES, 2014).

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar os parâmetros da germinação de sementes de milho e soja, obtidos por modelos lineares generalizados, investigando qual função de ligação será a mais adequada para prever o potencial fisiológico de sementes.

2. 2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Local do experimento e material vegetal

Para obtenção dos dados foram realizados experimentos no laboratório de Análise de Sementes do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, localizado no município de Botucatu-SP (22° 51' S de latitude, 48° 26' W de

longitude, e 786 m de altitude). Foram utilizadas sementes de milho das cultivares: AS 1633 PRO3, 2B587 RR, 2A401PW, AL Bandeirante e BRS 4103, e soja as cultivares: DS59716 IPRO, CD2737 RR, CD251 RR, CD2820 IPRO e CD2857 RR cultivados na safra 2016/17.

2.2.2 Obtenção dos dados

Avaliou-se a germinação de 20 sementes com quatro repetições por cultivar utilizando-se o teste de emissão da raiz primária (protrusão). Para tanto, as sementes de milho e soja foram distribuídas em folhas de papel toalha tipo “germitest” umedecidas com a quantidade de água equivalente a 2,5 vezes a massa do papel seco, o teste foi realizado entre o papel em placas de “petri” e estas foram mantidas em câmara de germinação Biochemical Oxygen Demand (B.O.D), regulada para a temperatura de 25 °C. A contagem das sementes germinadas foi efetuada em intervalos regulares de 6, 12 e 24 horas até 204 horas, adotando-se como critério de germinação a protrusão da raiz primária ≥ 2 mm. Os resultados foram expressos na proporção entre o número de sementes germinadas em cada intervalo de tempo e o número de sementes viáveis obtidas no final do experimento, dado por uma sequência de ensaios de Bernoulli.

2.2.3 Modelos de regressão binomiais e critérios de seleção

Uma vez que a variável resposta, ou seja, a proporção de sementes germinadas ao longo do tempo possui distribuição exponencial, foi considerada a utilização dos modelos lineares generalizados propostos por Nelder e Wedderburn (1972). Estes modelos são constituídos de três partes: componente aleatório do modelo em que a variável resposta possui distribuição pertencente à família exponencial; por um componente sistemático formado por um conjunto de variáveis independentes e pela função de ligação, que faz a ligação entre o componente aleatório e o componente sistemático.

A distribuição padrão assumida para variável aleatória Y_i , $i = 1, \dots, n$, que é o número de sementes germinadas, é a binomial com parâmetro m_i e probabilidade de sucesso π_i , isto é, $Y_i \sim \text{Binomial}(m_i, \pi_i)$. Assim, as funções de ligação utilizadas para regressão binomial foram a Probit, Logit e Complemento Log Log. As formas canônicas desses modelos são apresentadas a seguir e, segundo McCullagh e Nelder (1989), a utilização dessas funções na forma canônica apresenta como

vantagens uma escala adequada para a modelagem com interpretação prática dos parâmetros do modelo e a simplificação dos algoritmos de estimação. Assim, esses modelos na forma canônica são:

$$g(\mu_i) = \Phi^{-1}(\mu_i/m_i) = \Phi^{-1}(\pi_i) \quad (9)$$

$$g(\mu_i) = \log\left(\frac{\mu_i}{m_i - \mu_i}\right) = \log\left(\frac{\pi_i}{1 - \pi_i}\right) \quad (10)$$

$$g(\mu_i) = \log\left\{-\log\left(1 - \frac{\mu_i}{m_i}\right)\right\} = \log\{-\log(1 - \pi_i)\} \quad (11)$$

em que μ_i é a média e $\Phi(\cdot)$ é a função de distribuição acumulada da normal padrão.

Os parâmetros dos modelos foram obtidos utilizando o método da máxima verossimilhança. Cordeiro e Demétrio (2013) recomendam o uso do método da máxima verossimilhança devido às propriedades excelentes, de consistência e assintótico. Quando obtidos os parâmetros β_0 e β_1 a verificação do ajuste foi feita pelos critérios de *Deviance*, critério de informação de Akaike (AIC) e bayseano (BIC).

O critério *Deviance* é utilizado como uma medida de discrepância, medindo a qualidade de ajuste dos modelos, para isso utiliza-se a estatística *log* da taxa de verossimilhança. Por esse critério, um modelo é considerado ideal quando resulta em um valor significativamente pequeno do desvio, ou seja, gerando evidências de que, para uma quantidade pequena de parâmetros obtém-se um ajuste tão bom quanto o modelo saturado (CORDEIRO; DEMÉTRIO, 2013). No que se refere à distribuição binomial, a *Deviance* foi definida por:

$$D_B = 2 \sum_{i=1}^n \left[y_i \log\left(\frac{y_i}{\hat{\mu}_i}\right) + (m_i - y_i) \log\left(\frac{m_i - y_i}{m_i - \hat{\mu}_i}\right) \right], \quad (12)$$

em que y_i , é o valor observado no fator i , $m_i = n$: tamanho da amostra, $\hat{\mu}_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, são os valores ajustados para o modelo de interesse.

Assim, quando a *Deviance*, dividida pelo número de graus de liberdade, não for próxima a 1, existe um indicativo que o modelo pode estar mal ajustado, uma vez que os modelos binomiais possuem parâmetro de dispersão $\psi = 1$, que é fixo. Valores do parâmetro de dispersão $\psi < 1$ e $\psi > 1$ indicam subdispersão e superdispersão, respectivamente.

Quando verificado o efeito de sub ou superdispersão, incorporou-se um parâmetro de dispersão constante (ψ), utilizando para estimação o método da máxima “quase-verossimilhança”. O parâmetro de dispersão ψ foi estimado a partir da raiz quadrada do quociente da *Deviance* pelos graus de liberdade. Dessa forma, com esse novo parâmetro de dispersão os erros padrões dos parâmetros (β_0 e β_1) foram corrigidos, de modo que as inferências nos testes de significâncias sejam reformuladas. Tal correção foi realizada conforme descrito pela equação (13):

$$Ep_{\text{corrigido}} = \hat{\psi} \times Ep \quad (13)$$

Dentre os critérios mais precisos e empregados na literatura para avaliar qualidade de ajuste estão os critérios de informação de Akaike (AIC) (AKAIKE, 1973) e o bayseano (BIC) (SCHWARZ, 1978). Ambos os critérios penalizam a falta de ajuste aos dados e a complexidade do modelo, de modo que os menores valores são preferidos (EMILIANO; VIVANCO; MENEZES, 2014). As expressões são mostradas em (14) e (15), respectivamente.

$$AIC = -2\log L + 2p, \quad (14)$$

$$BIC = -2\log L + p \log(n) \quad (15)$$

em que: p = é o número de parâmetros; L = valor da razão de máxima verossimilhança e n = número de observações.

2.2.4 Tempos de germinação e uniformidade de germinação

Após a seleção do modelo mais parcimonioso foram calculados os tempos necessários para germinar 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90 e 99% para cada cultivar de milho e soja, por repetição. A uniformidade de germinação (U7525) foi calculada pela diferença dos tempos necessários para germinação de 75 e 25%. Para calcular cada tempo já mencionado foram utilizadas as fórmulas abaixo e a Tabela 6, dependendo do modelo selecionado:

$$Probit(\hat{\theta}_p) = \frac{1}{\hat{\beta}_1} [\Phi^{-1}(p) - \hat{\beta}_0] \quad (16)$$

$$Logit(\hat{\theta}_p) = \frac{1}{\hat{\beta}_1} \left[\log\left(\frac{p}{1-p}\right) \hat{\beta}_0 \right], \quad (17)$$

$$CLL(\hat{\theta}_p) = \frac{1}{\hat{\beta}_1} \{ \log[-\log(1-p)] - \hat{\beta}_0 \} \quad (18)$$

em que $\hat{\theta}_p$ é a estimativa da probabilidade de germinação no tempo especificado.

Tabela 6 - Tabela padrão para o cálculo das probabilidades de germinação obtido pelas funções Probit, Logit e Complemento Log Log (CLL).

%Germinação	Probabilidades	Probit	Logit	CLL
	$p = (\%Germinação/100)$	$\Phi^{-1}(p)$	$\log\left(\frac{p}{1-p}\right)$	$\log[-\log(1-p)]$
1	0,010	-2,32635	-4,59512	-4,60015
2	0,020	-2,05375	-3,89182	-3,90194
3	0,030	-1,88079	-3,4761	-3,49137
4	0,040	-1,75069	-3,17805	-3,19853
5	0,050	-1,64485	-2,94444	-2,9702
6	0,060	-1,55477	-2,75154	-2,78263
7	0,070	-1,47579	-2,58669	-2,62319
8	0,080	-1,40507	-2,44235	-2,48433
9	0,090	-1,34076	-2,31363	-2,36116
10	0,100	-1,28155	-2,19722	-2,25037
16	0,160	-0,99446	-1,65823	-1,74667
20	0,200	-0,84162	-1,38629	-1,49994
25	0,250	-0,67449	-1,09861	-1,2459
30	0,300	-0,5244	-0,8473	-1,03093
40	0,400	-0,25335	-0,40547	-0,67173
50	0,500	0	0	-0,36651
60	0,600	0,253347	0,405465	-0,08742
70	0,700	0,524401	0,847298	0,185627
75	0,750	0,67449	1,098612	0,326634
80	0,800	0,841621	1,386294	0,475885
84	0,840	0,994458	1,658228	0,605726
90	0,900	1,281552	2,197225	0,834032
91	0,910	1,340755	2,313635	0,878774
92	0,920	1,405072	2,442347	0,92653
93	0,930	1,475791	2,586689	0,978048
94	0,940	1,554774	2,751535	1,034398
95	0,950	1,644854	2,944439	1,097189
96	0,960	1,750686	3,178054	1,169032
97	0,970	1,880794	3,476099	1,254635
98	0,980	2,053749	3,89182	1,364055
99	0,990	2,326348	4,59512	1,52718

2.2.5 Análise estatística dos tempos de germinação

Os tempos de germinação T10, T50, T99 e U7525 (uniformidade) foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk (modificado) (RAHMAN;

GOVINDARAJULU, 1997), seguindo-se com a análise univariada, considerando o delineamento inteiramente casualizado com a aplicação do teste LSD de Fisher, a 5% de probabilidade.

Posteriormente, objetivando conhecer o comportamento da germinação das cultivares de milho e soja de forma global os tempos de germinação (T10, T20, T30, T40, T50, T60, T70, T80, T90 e T99) e a uniformidade (U7525) foram submetidos à técnica classificatória multivariada de agrupamento pelo método de Ward, utilizando a distância Euclidiana, pela matriz de dados padronizados para cada variável pela fórmula:

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad (19)$$

em que: Z = Valor observado padronizado; X = Valor observado; \bar{x} = Média; S = Desvio padrão.

2.2.6 Aspectos computacionais

O trabalho foi realizado utilizando sistema SAS[®] - Statistical Analysis System, versão 9.4 por meio dos procedimentos GENMOD para os ajustes e seleção de modelos, e GLM para análises univariadas. Para as análises multivariadas e confecção de gráficos, foi utilizado o software Minitab[®]17.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ajustando as funções de ligação Probit, Logit e Complemento Log Log para as 10 cultivares testadas, observou-se que nenhuma cultivar apresentou ajuste adequado de forma simultânea pelas funções de ligação quando considerado o critério *Deviance*. As cultivares de milho e soja com parâmetro de dispersão mais próximo de 1, foram: AS 1633 PRO3 e CD251 RR, ambas ajustadas pela função de ligação Logit. O fenômeno da superdispersão foi verificado em seis cultivares de forma simultânea pelas funções de ligação com valores de *Deviance* a partir de 1,3 ao passo que, somente a cultivar de milho BRS 4103 apresentou subdispersão indicada pelas três funções utilizadas (Tabela 7).

Tabela 7 - Critérios de ajuste e seleção de modelos para as cultivares de milho e soja.

Milho				
Cultivares	Funções	Deviance	AIC	BIC
AS 1633 PRO3	Probit	1,2323	94,9727	99,1614
	Logit	1,0959	89,2441	92,8125
	*CLL	2,3024	139,9203	143,4887
2B587 RR	Probit	2,1019	175,0623	179,113
	Logit	1,7032	153,5324	157,5831
	*CLL	4,2072	288,7501	292,8008
2A401PW	Probit	0,6858	63,7015	67,2699
	Logit	0,5467	57,8575	61,4259
	*CLL	1,7637	108,9745	112,5429
AL Bandeirante	Probit	1,8101	102,825	105,992
	Logit	1,8553	104,3612	107,5282
	*CLL	2,2246	116,9184	120,0854
BRS 4103	Probit	0,3884	77,0489	80,4267
	Logit	0,417	78,1381	81,5159
	*CLL	0,335	75,0199	78,3977
Soja				
Cultivares	Funções	Deviance	AIC	BIC
DS59716 IPRO	Probit	1,5779	104,7622	107,9293
	Logit	1,6267	106,4205	109,5876
	*CLL	2,0302	120,1383	123,3053
CD2737 RR	Probit	1,4961	100,379	103,5461
	Logit	1,303	93,8137	96,9807
	*CLL	2,8422	525,0664	529,1771
CD251 RR	Probit	1,1934	89,7302	92,8972
	Logit	1,0035	83,2745	86,4415
	*CLL	2,4862	133,6866	136,8537
CD2820 IPRO	Probit	1,8319	133,1682	136,8255
	Logit	1,7514	129,4662	133,2086
	*CLL	3,1479	193,7053	197,4477
CD2857 RR	Probit	4,3249	259,9286	263,671
	Logit	2,8754	193,2493	196,9917
	*CLL	7,699	415,1366	418,879

*Complemento Log Log; critério de informação de Akaike (AIC) e critério de informação bayseano (BIC).

Os fenômenos de sub e superdispersão foram definidos por McCullagh e Nelder (1989) como uma variância da variável resposta acima ou abaixo da variância esperada pelo modelo adotado. As principais consequências desses fenômenos estão na estimação dos erros padrões, que por consequência podem induzir a

escolha inadequada dos modelos, o que potencialmente compromete as conclusões (HARRISON, 2015). Mesmo diante do esforço dos pesquisadores em controlar as condições experimentais, a ocorrência de fenômenos como a superdispersão é comum, pois em sistemas agrícolas existem grande variabilidade (SURIYAGODA et al., 2012; RIZZARDI et al., 2017).

Dentre as funções de ligação avaliadas, a Complemento Log Log foi a que proporcionou os maiores valores de *Deviance*, ou seja, a maioria dos modelos formulados com essa função de ligação apresentaram-se superdispersos, com exceção da cultivar BRS 4103. Enquanto as funções Probit e Logit apresentaram os menores desvios sendo estes mais próximos, todavia a função Logit foi a que proporcionou melhores ajustes, apresentando ajuste adequado em 7 das 10 cultivares utilizadas na pesquisa (Tabela 7).

Esses resultados demonstram a importância de considerar a escolha da função de ligação correta, pois a utilização de modelos imprecisos é potencialmente geradora de conclusões equivocadas (HARRISON, 2015; RIZZARDI et al., 2017). Apesar do modelo Logit ser atualmente o preferido em algumas áreas como, por exemplo, na biometria (NUNES; MORAIS; BUENO FILHO, 2004; DEMÉTRIO, HINDE; MORAL, 2014; NATTINO; LU, 2018), e no presente estudo ter obtido os menores desvios para a maioria das cultivares estudadas, ainda assim se faz necessário o estudo comparativo entre funções de ligação buscando aquela que melhor descreve a probabilidade de interesse (FREITAS, 2013).

Para todas as cultivares testadas houve concordância entre o critério de *Deviance* e os critérios de informação de AIC e BIC, ou seja, aquelas funções com menores desvios também foram aquelas com menores valores de AIC e BIC (Tabela 7). Essa concordância facilitou a seleção dos modelos mais parcimoniosos para avaliar a germinação de sementes de milho e soja. Assim, o modelo Probit foi escolhido para avaliar a germinação de duas cultivares, o modelo Logit de sete cultivares e o Complemento Log Log de uma cultivar (Tabela 8).

Tabela 8 - Estimativa dos parâmetros dos modelos de regressão binomial ajustados aos dados de proporção na germinação de milho e soja.

Milho							
Cultivares	Função	Parâmetro	Estimativa	Ep	Ep corrigido	Valor p	Valor p corrigido
AS 1633 PRO3	Logit	β_0	-8,6418	0,7731	0,8093	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,1653	0,0158	0,0165	<0,0001	<0,0001
		ψ	1,0468	-	-	-	-
2B587 RR	Logit	β_0	-5,9099	0,3861	0,5039	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,1009	0,0074	0,0096	<0,0001	<0,0001
		ψ	1,3051	-	-	-	-
2A401PW	Logit	β_0	-12,9499	1,2264	0,9068	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,2417	0,0237	0,0175	<0,0001	<0,0001
		ψ	0,7394	-	-	-	-
AL Bandeirante	Probit	β_0	-5,8063	0,4596	0,6183	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,1616	0,0126	0,0170	<0,0001	<0,0001
		ψ	1,3454	-	-	-	-
BRS 4103	CLL	β_0	-6,0826	0,4315	0,2497	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,1521	0,0108	0,0063	<0,0001	<0,0001
		ψ	0,5788	-	-	-	-
Soja							
Cultivares	Função	Parâmetro	Estimativa	Ep	Ep corrigido	Valor p	Valor p corrigido
DS59716 IPRO	Probit	β_0	-4,4746	0,3207	0,4028	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,1291	0,0091	0,0114	<0,0001	<0,0001
		ψ	1,2562	-	-	-	-
CD2737 RR	Logit	β_0	-7,1362	0,5913	0,6749	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,2666	0,0214	0,0245	<0,0001	<0,0001
		ψ	1,1415	-	-	-	-
CD251 RR	Logit	β_0	-7,5645	0,6589	0,6600	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,2810	0,0238	0,0239	<0,0001	<0,0001
		ψ	1,0017	-	-	-	-
CD2820 IPRO	Logit	β_0	-7,4894	0,5670	0,7504	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,1410	0,0116	0,1110	<0,0001	<0,0001
		ψ	1,3234	-	-	-	-
CD2857 RR	Logit	β_0	-6,0158	0,4445	0,7537	<0,0001	<0,0001
		β_1	0,1799	0,0130	0,0221	<0,0001	<0,0001
		ψ	1,6957	-	-	-	-

Parâmetros estimados ao nível de 5% de probabilidade; β_0 = intercepto; β_1 = coeficiente angular; ψ = parâmetro de escala calculado pelo desvio dividido pelos graus de liberdade e Ep = erro padrão.

Os critérios de informação apresentados penalizam a falta de ajuste aos dados e a complexidade do modelo, de modo que aqueles modelos de menores valores

foram escolhidos (RESENDE, 2007; EMILIANO; VIVANCO; MENEZES, 2014). Por esses critérios, a função Logit se destaca como uma boa alternativa para avaliar a germinação das sementes de milho e soja, gerando bases teóricas para outras áreas como, por exemplo, na ciência e tecnologia de sementes, contrapondo a ideia de que sempre o modelo Probit deve ser empregado, para avaliar qualidade fisiológica, desde germinação na longevidade a modelos termais (ELLIS; ROBERTS, 1980; DAIBES; CARDOSO, 2018).

Mantendo o foco na estimativa do parâmetro de dispersão, os modelos selecionados tiveram seus erros padrões das estimativas corrigidos por quase-verossimilhança utilizando a *Deviance* para estimar o parâmetro de dispersão constante, no qual foi utilizado no procedimento em (13). Com a aplicação dessa correção, conforme se esperava, os erros padrões apresentaram um aumento para os modelos com superdispersão e uma diminuição para os modelos com subdispersão, todavia a significância dos parâmetros não foram afetadas (Tabela 8).

A utilização da quase-verossimilhança para corrigir os erros padrões estimados é recomendado por Hinde e Demétrio (1998), e tem sido adotado em trabalhos de germinação de sementes (NUNES et al., 2004; MURPHEY et al., 2015), em dados de entomologia (RIBEIRO et al., 2013; LISKA et al., 2015), na avaliação de dados ecológicos (HARRISON, 2015), na modelagem do número e da massa de matéria seca de nódulos de *Rhizobium* na cultura do feijão (RIZZARDI et al., 2017). Portanto, existe uma literatura sólida quanto ao emprego desta metodologia.

De posse dos modelos selecionados (Tabela 8) é possível estimar os tempos de germinação de interesse do pesquisador, utilizando as formulas apresentadas em (16), (17) e (18). O tempo médio de germinação ou o tempo necessário para 50% das sementes utilizadas nos experimentos germinarem (T50) é tido como o preferido para descrever a germinação e qualidade fisiológica das sementes submetidas a diferentes tratamentos ou ainda para comparar diferentes lotes de sementes (EL-KASSABY et al., 2008; JOOSEN et al., 2010; MATTHEWS et al., 2012; HATZIG et al., 2015; DAIBES; CARDOSO, 2018).

No caso dos modelos Probit e Logit o T50 pode ser obtido facilmente, uma vez que os parâmetros β_0 e β_1 formam uma equação linear do tipo $y = a \pm bx$, onde igualando os termos da equação à zero obtém-se o T50, pois ambos os modelos

possuem simetria em torno de zero. Assim, para calcularmos o T50 podemos utilizar a seguinte formula:

$$T50 = \frac{\beta_0}{\beta_1} \times (-1) \quad (20)$$

em que β_0 é o intercepto e β_1 o ângulo de inclinação.

Na Tabela 9 são demonstrados os T50 obtidos para as 10 cultivares adotando-se os modelos fornecidos na Tabela 8 e o intervalo esperado para esse parâmetro obtido de forma experimental. Assim, podemos considerar a metodologia dos modelos lineares generalizados adotando a distribuição binomial eficiente para avaliar a germinação de milho e soja, uma vez que todos os resultados estimados pelas funções escolhidas apresentam-se contidos nos intervalos experimentais.

Tabela 9 - Estimativas do T50 obtido a partir das equações da tabela 8 e intervalo experimental no qual está contido o T50.

	Cultivares	T50 (Tabela 8)	T50 (Intervalo experimental)
Milho	AS 1633 PRO3	52,3 h	48 a 60 h
	2B587 RR	58,3 h	48 a 60 h
	2A401PW	53,6 h	48 a 60 h
	AL Bandeirante	35,9 h	30 a 36 h
	BRS 4103	37,6 h	36 a 42 h
	Cultivares	T50 (Tabela 8)	T50 (Intervalo experimental)
Soja	DS59716 IPRO	34,6 h	30 a 36 h
	CD2737 RR	26,8 h	24 a 30 h
	CD251 RR	26,9 h	24 a 30 h
	CD2820 IPRO	53,1 h	48 a 60 h
	CD2857 RR	33,4 h	30 a 36 h

Por mais que autores defendam o uso dos modelos lineares para estimar os tempos de germinação considerando a suposição de normalidade dos dados (ELLIS; ROBERTS, 1980; BRADFORD, 2002; DAIBES; CARDOSO, 2018), muitas vezes uma simples transformação das porcentagens de germinação usando uma determinada função de ligação, como por exemplo, o modelo Probit (função *inv. Norm* no Microsoft Excel) não permite linearizar o conjunto de dados (GAZOLA et al., 2011; DAIBES; CARDOSO, 2018). Dessa maneira, uma abordagem

considerando a germinação como uma variável binária, em que as sementes podem ou não germinar tem sido mais indicada (HAY; MEAD; BLOOMBERG, 2014; MURPHEY et al., 2015).

Vale destacar que outro diferencial do trabalho é que os tempos de germinação calculados são obtidos com base no número de sementes viáveis, ou seja, a definição correta para o T50 na presente pesquisa é o tempo necessário para 50% das sementes viáveis germinarem, não necessitando de fórmulas adicionais para calcular a real quantidade de sementes germinadas.

Além do tradicional T50, outros parâmetros podem ser utilizados para avaliar a germinação de um lote de sementes, por exemplo, pode-se calcular o tempo para 10% das sementes viáveis germinarem, ou também se estamos interessados em saber se dois lotes com germinações finais possuem a mesma uniformidade de germinação ou ainda entender a germinação como um processo global, não se restringindo apenas a poucos parâmetros que podem levar a falsas conclusões sobre a qualidade fisiológica de um lote de sementes.

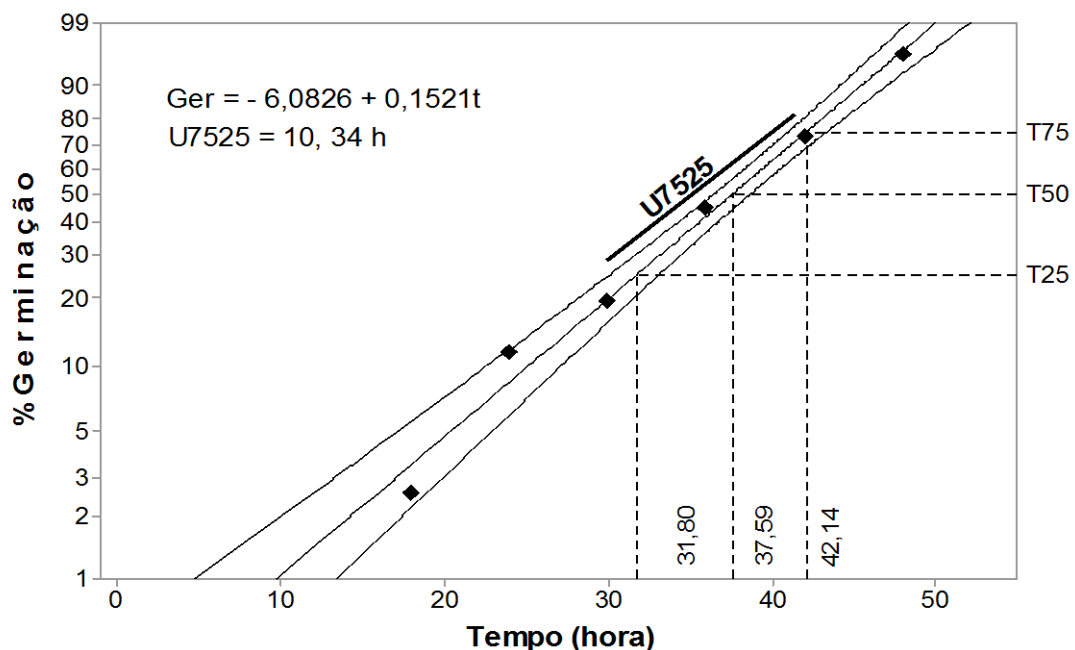
Como exemplo do uso de outros parâmetros para avaliar a germinação, temos os trabalhos de El-Kassaby et al. (2008) e Joosen et al. (2010) utilizando a função não linear de Hill de quatro parâmetros para estimar além do T50, o tempo máximo de germinação e a uniformidade de germinação, que é o intervalo de tempo entre duas germinações pré-definidas. Os tempos de germinação de 10 e 90% das sementes também têm sido calculados (COOLBEAR; MCGILL, 1990; DAIBES; CARDOSO, 2018) para avaliação da qualidade fisiológica de sementes. Todavia, as duas estatísticas mais difundidas para avaliar a germinação de um lote de sementes são o T50 e a uniformidades de germinação (COOLBEAR; MCGILL, 1990; JOOSEN et al., 2010; NETO et al., 2018).

A uniformidade de germinação ao contrário do T50 não existe uma padronização, sendo adotadas de várias maneiras: U9010 (tempo para 90% de germinação – tempo para 10% de germinação) (COOLBEAR; MCGILL, 1990), U8416 (tempo para 84% de germinação – tempo para 16% de germinação) (NETO et al., 2018), U7525 (tempo para 75% de germinação – tempo para 25% de germinação) (JOOSEN et al., 2010), sendo está última a mais tradicional.

Assim, aqueles lotes de sementes ou cultivares que exibirem os menores valores de T50 ou qualquer outro tempo de germinação podem ser considerados de maior qualidade fisiológica, o mesmo raciocínio é válido para a uniformidade de germinação (COOLBEAR; MCGILL, 1990; JOOSEN et al., 2010; MATTHEWS et al., 2012).

Atualmente, as pesquisas que envolvem a avaliação da germinação de sementes para determinar os parâmetros mencionados anteriormente usam na sua grande parte modelos não lineares ou alguma função de ligação diretamente sobre os dados percentuais, sem atentarem para tipo de variável estudada e sua distribuição de probabilidade, o que muitas vezes causa problemas de convergência ou até mesmo erros severos na estimação dos parâmetros (JOOSEN et al., 2010; DAIBES; CARDOSO, 2018; NETO et al., 2018). No entanto, quando utilizamos os modelos lineares generalizados tais dificuldades são superadas, pois estamos trabalhando com uma equação linear simples. Como demonstração, a germinação da cultivar de milho BRS 4103 foi modelada pela função Complemento Log Log evidenciando o T50 e a uniformidade de germinação (Figura 3).

Figura 3 - Tempos de germinação de cultivar de milho BRS 4103 estimados pela função de ligação Complemento Log Log.



*T25 = 31,80 h; T50 = 37,59 h; T75 = 42,14 h e uniformidade de germinação U7525. A 5% de probabilidade. A representação para as demais cultivares pode ser observado no apêndice B.

Após a seleção das funções de ligação mais adequadas para avaliar a germinação de cada lote, determinou-se os tempos de germinação T10, T50, T99 e U7525, para todos os dados amostrados, sendo a seguir, realizada a análise de variância e complementada com o teste de médias (LSD) com o objetivo de comparar o potencial fisiológico das cultivares de milho e soja. De acordo com teste de Shapiro-Wilk (modificado) (RAHMAN; GOVINDARAJULU, 1997), os quatro parâmetros avaliados possuem distribuição normal. Os resultados da análise de variância revelaram que o teste F foi significativo para todos os parâmetros do milho, ao passo que, para as cultivares de soja, somente a uniformidade de germinação não foi significativa a 5% de probabilidade.

Ao avaliar o T10 foi possível observar que a cultivar de milho 2A401PW foi a que apresentou germinação mais lenta, enquanto as cultivares AL Bandeirante e BRS 4103 exibem germinações mais rápidas. Para as cultivares de soja avaliadas, a cultivar CD2820 IPRO foi a que apresentou germinação mais lenta, apresentando diferença das demais cultivares e chegando a levar o dobro de tempo para alcançar 10% da germinação quando comparada com as cultivares CD251 RR e CD2737 RR (Tabela 10).

Tabela 10 - Tempos de germinação e uniformidade para as cultivares de milho e soja.

	Cultivares	T10*	T50*	T99*	U7525[#]
Milho	2A401PW	44,83 a	53,6 a	71,94 b	8,77 b
	AS 1633 PRO3	40,15 ab	52,83 a	79,34 b	12,68 b
	2B587 RR	37,44 b	58,35 a	102,07 a	20,91 a
	AL Bandeirante	29,45 c	35,95 b	47,73 c	6,83 c
	BRS 4103	25,26 c	37,58 b	49,96 c	11,19 b
	Cultivar	T10	T50	T99	U7525
Soja	CD2820 IPRO	40,3 a	53,38 a	80,74 a	13,08 ns
	DS59716 IPRO	25,73 b	34,63 b	50,79 bc	9,37 ns
	CD2857 RR	22,05 b	33,45 bc	57,29 b	11,40 ns
	CD251 RR	19,44 b	26,94 c	42,62 c	7,50 ns
	CD2737 RR	19,01 b	26,8 c	43,11 c	7,80 ns

* T10, T50 e T99 = tempo necessário para ocorrência de germinação de 10, 50 e 99% das sementes viáveis; [#]U7525 = uniformidade de germinação dada pela diferença entre os percentis 75 e 25%; ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade; médias seguidas por letras iguais minúsculas nas colunas não diferem entre si pelo teste LSD de Fisher a 5%.

O comportamento das cultivares no T50 foi alterado em relação ao T10, apenas para a cultivar 2B587 RR, as cultivares de milho AL Bandeirante e BRS 4103 mostraram-se também mais rápidas para atingir 50% de germinação em aproximadamente 16 h. Para soja a cultivar CD2820 IPRO continuou sendo menos vigorosa, ao passo que as cultivares CD251 RR e CD2737 RR continuaram exibindo maior qualidade fisiológica (Tabela 10).

O tempo para 99% das sementes germinarem foi calculado com objetivo de determinar o comportamento das cultivares quando estão próximas a completarem 100% de germinação. Assim, observa-se que a cultivar de milho 2B587 RR que não apresentava diferença estatística nos tempos anteriores com a cultivar AS 1633 PRO3 apresentaram diferença em mais de 22 h. Essa diferenciação pode ser devido à uniformidade, uma vez que a cultivar de milho 2B587 RR se mostrou a menos uniforme. A cultivar de milho de melhor desempenho no tempo T99 foi AL Bandeirante sendo também a mais uniforme. Para as cultivares de soja no tempo T99 comprovou-se que CD2820 IPRO é a menos vigorosa e as cultivares CD251 RR e CD2737 RR as de maior qualidade fisiológica.

A menor ou maior velocidade de germinação de uma cultivar em relação à outra, deve-se ao fato do tempo gasto na restauração das organelas e dos tecidos danificados antes de iniciarem o desenvolvimento do eixo embrionário, durante o processo de germinação (VILLIERS, 1973; MATTHEWS et al., 2012). Segundo Villiers (1973) cultivares ou lotes de sementes com maior velocidade de germinação e uniformidade são considerados os mais vigorosos.

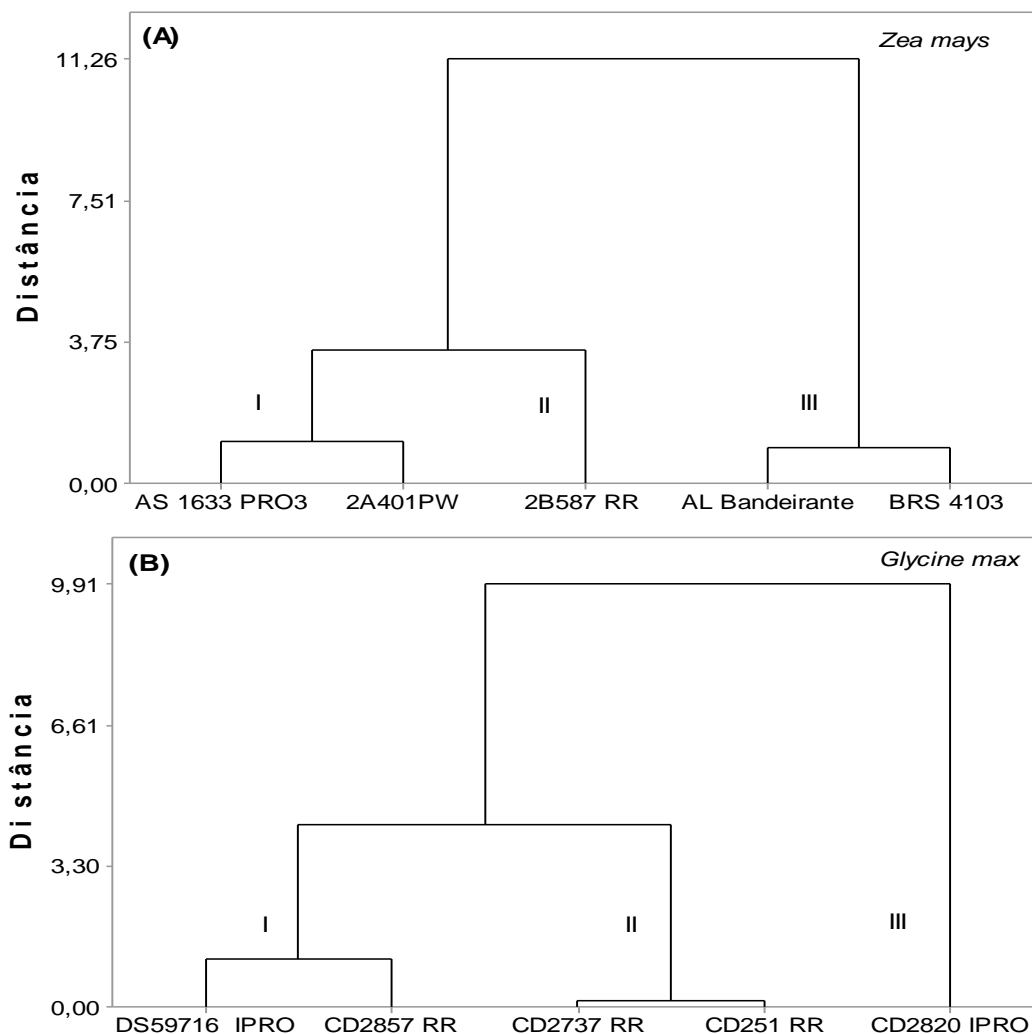
O vigor de um lote de sementes pode ser definido como a soma das propriedades que determinam a atividade e o desempenho dos lotes de sementes de germinação aceitável em uma ampla gama de ambientes (AOSA, 1983; BAALBAKI et al., 2009). Assim, a identificação de lotes de sementes ou cultivares de alta performance é uma iniciativa importante para o sucesso da produção agrícola (MARCOS FILHO, 2015).

Nesses pressupostos, elencamos as cultivares de milho AL Bandeirante e BRS 4103 e as cultivares de soja CD251 RR e CD2737 RR como as de maior vigor tendo como base os tempos de germinação e uniformidade. Tal afirmação é sustentada por vários autores que, utilizando uma simples contagem de radícula conseguiram prever o vigor de várias espécies (KHAJEH-HOSSEINI; LOMHOLT;

MATTHEWS, 2009; KHAJEH-HOSSEINI; NASEHZADEH; MATTHEWS, 2010; MATTHEWS et al., 2012).

A maior qualidade fisiológica dessas cultivares fica evidenciada quando analisamos a germinação em um contexto mais amplo, considerando vários tempos de germinação (T10, T20, T30, T40, T50, T60, T70, T80, T90 e T99) e a uniformidade padrão (U7525) por meio da análise classificatória multivariada. De maneira geral, o coeficiente cofenético foi acima de 0,90 indicando pouca distorção com matriz original de dados (SILVA; DIAS, 2013). Foi possível verificar a existência de três agrupamentos, no dendograma, tanto para milho quanto para soja (Figura 4).

Figura 4 - Dendograma incluindo os tempos de germinação e uniformidade para as sementes de milho (A) e soja (B).



*I, II e III = grupos formados após a análise multivariada pelo método de Ward utilizando a distância Euclidiana.

As cultivares de milho de menor distância foram a AL Bandeirante e BRS 4103, com distância Euclidiana igual a 0,96 (Tabela 11), ou seja, possuem qualidade fisiológica semelhante, corroborando com os resultados obtidos para T10, T50 e T99 (Tabela 10). A maior diferença quanto à qualidade fisiológica foi observada entre as cultivares BRS 4103 e 2B587 RR apresentando distância Euclidiana superior a 7 (Tabela 11). Em relação às cultivares de soja, as mais próximas ou menos distantes foram as cultivares CD251 RR e CD2737 RR com distância Euclidiana igual a 0,15 (Tabela 11), corroborando com os resultados apresentados anteriormente (Tabela 10). E os potenciais fisiológicos mais distantes foram observados para a cultivar CD2820 IPRO com as cultivares CD251 RR e CD2737 RR com distância Euclidiana igual a 8,02 (Tabela 11).

Tabela 11 - Distâncias Euclidianas entre as cultivares de milho e soja obtida a partir do método de Ward.

Milho					
Cultivares	2A401PW	2B587 RR	AL Bandeirante	AS 1633 PRO3	BRS 4103
2A401PW	0	0	0	0	0
2B587 RR	3,34	0	0	0	0
AL Bandeirante	5,26	7,15#	0	0	0
AS 1633 PRO3	1,13	2,53	5,07	0	0
BRS 4103	5,22	6,71	0,96**	4,85	0

Soja					
Cultivares	CD251 RR	CD2737 RR	CD2820 IPRO	CD2857 RR	DS59716 IPRO
CD251 RR	0	0	0	0	0
CD2737 RR	0,15**	0	0	0	0
CD2820 IPRO	8,02#	8,02#	0	0	0
CD2857 RR	2,61	2,54	5,79	0	0
DS59716 IPRO	2,32	2,31	5,72	1,11	0

**Menor e # maior distância obtida.

2.4 CONCLUSÕES

A avaliação da germinação na forma de proporções considerando a pressuposição de resposta binomial é satisfatória, sendo que a escolha da função de ligação dependerá das características de cada lote e espécie avaliada. A metodologia apresentada no presente trabalho permite calcular qualquer tempo de germinação e uniformidade de forma mais robusta. As cultivares de milho AL

Bandeirante e BRS 4103 e as cultivares de soja CD251 RR e CD2737 RR foram consideradas as mais vigorosas.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico “CNPq”, pela bolsa de estudos concedida. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo “FAPESP”, pelo auxílio pesquisa, processo n° 2016/13126-0.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIATION OF OFFICIAL SEED ANALYSTS – AOSA. **Seed vigor testing handbook**. East Lansing: AOSA, 1983. 93p.

BAALBAKI, R.; ELIAS, S.; MARCOS-FILHO, J.; MCDONALD, M.B. 2009. Seed vigor testing handbook, AOSA, Ithaca, NY, USA. **Contribution to the Handbook on Seed Testing**, v. 32, 2009.

BRADFORD, K, J. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. **Weed Science**, v. 50, n. 2, p.248-260, 2002.

BRASIL. **Acompanhamento da safra Brasileira**: novembro 2018. v.6 Safra 2018/19, p. 1-142, 2018. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> >. Acesso em: 15 nov. 2018.

COOLBEAR, P.; MCGILL, C. R. Effects of a low-temperature pre-sowing treatment on the germination of tomato seed under temperature and osmotic stress. **Scientia Horticulturae**, v. 44, n. 1-2, p. 43-54, 1990.

CORDEIRO, G. M.; DEMÉTRIO, C. G. B. **Modelos lineares Generalizados e Extensões**. São Paulo, 2013.

DAIBES, L. F.; CARDOSO, V. J. M. Seed germination of a South American forest tree described by linear thermal time models. **Journal of Thermal Biology**, v. 76, p.156-164, 2018.

DEMÉTRIO, C. G. B.; HINDE, J.; MORAL, R. A. Modelos para dados superdispersos em entomologia. In: **Modelagem ecológica aplicada à entomologia**. Springer, Cham, 2014. p. 219-259.

DINIZ, F. O.; REIS, M. S.; DIAS, L. A. S.; ARAÚJO, E. F.; SEDIYAMA, T.; SEDIYAMA, C. A. Physiological quality of soybean seeds of cultivars submitted to harvesting delay and its association with seedling emergence in the field. **Journal of Seed Science**, v.35, n.2, p.147-152, 2013.

ELLIS, R. H.; ROBERTS, E. H. Improved equations for the prediction of seed longevity. **Annals of Botany**, v.45, n.1, p. 13-30, 1980.

EL-KASSABY, Y. A.; MOSS, I.; KOLOTELO, D.; STOEHR, M. Seed germination: Mathematical representation and parameters extraction. **Forest Science**, v. 54, n. 2, p. 220-227, 2008.

EMILIANO, P. C.; VIVANCO, M. J. F.; MENEZES, F. S. Information criteria: how do they behave in different models? **Computational Statistics & Data Analysis**, Cambridge, v. 69, p. 141-153, 2014.

FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A.; PÁDUA, G. P. Tecnologia de produção de soja de alta qualidade. **Informativo ABRATES**, v. 20, n.3, p.26-32, 2010.

FREITAS, L.; FILHO, S.; JÚNIOR, J.; SILVA, F. Comparação das funções de ligação Probit e Logit em regressão binária considerando diferentes tamanhos amostrais. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, p.16, 2013.

GAZOLA, S.; SCAPIM, C. A.; GUEDES, T. A.; BRACCINI, A. L. Proposta de modelagem não-linear do desempenho germinativo de sementes de milho híbrido. **Ciência Rural**, v. 41, n. 4, p.551-556, 2011.

HARRISON, X. A. A. Comparison of observation-level random effect and Beta-Binomial models for modelling overdispersion in Binomial data in ecology & evolution. **PeerJ**, v. 3, p. e1114, 2015.

HATZIG, S. V.; MATTHIAS, F.; BREUER, F.; NESI, N.; DUCOURNAU, S.; WAGNER, M.-H. LECKBAND, G.; ABBADI, A.; SNOWDON, R. J. Genome-wide association mapping unravels the genetic control of seed germination and vigor in *Brassica napus*. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p.221, 2015.

HAY, F. R.; MEAD, A.; BLOOMBERG, M. Modelling seed germination in response to continuous variables: use and limitations of Probit analysis and alternative approaches. **Seed Science Research**, v.24, n.3, p.165-186, 2014.

HINDE J, DEMÉTRIO C. G. B. Overdispersion: models and estimation. **Computational Statistic & Data Analysis**, v.27, n.2, p.151-170, 1998.

JOOSEN, R. V. L.; KODDE, J.; WILLEMS, L. A. J.; LIGTERINK, W.; VAN DER PLAS, L. H. W.; HILHORST, H. W. M. Germinator: A software package for high-throughput scoring and curve fitting of *Arabidopsis* seed germination. **The Plant Journal**, v. 62, n. 1, p. 148-159, 2010.

KHAJEH-HOSSEINI, M.; LOMHOLT, A.; MATTHEWS, S. Mean germination time in the laboratory estimates the relative vigour and field performance of commercial seed lots of maize (*Zea mays* L.). **Seed Science and Technology**, v. 37, n. 2, p. 446-456, 2009.

KHAJEH-HOSSEINI, M.; NASEHZADEH, M.; MATTHEWS, S. Rate of physiological germination relates to the percentage of normal seedlings in standard germination tests of naturally aged seed lots of oilseed rape. **Seed Science and Technology**, v. 38, n. 3, p. 602-611, 2010.

LISKA, G. R.; SILVEIRA, E. C.; REIS, P. R.; CIRILLO, M. Â.; GONZALEZ, G. G. H. Seleção de um modelo de regressão binomial para taxa de predação de *Euseius concordis* (Chant, 1959). **Coffee Science**, v. 10, n. 1, p. 113-121, 2015.

MARCOS FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v.72, n.4, p.363-374, 2015.

MATTHEWS, S.; NOLI, E.; DEMIR, I.; KHAJEH-HOSSEINI, M. M.-H. Wagner Evaluation of seed quality: from physiology to international standardization. **Seed Science Research**, v. 22, n. S1, p. S69-S73, 2012.

McCULLAGH, P.; NELDER, J. A. **Generalized linear models**, Londres: Chapman and hall, 1989. 511p.

MURPHEY, M.; KOVACH, K.; ELNACASH, T.; HE, H.; BENTSINK, L.; DONOHUE, K. DOG1-imposed dormancy mediates germination responses to temperature cues. **Environmental And Experimental Botany**, v. 112, p.33-43, 2015.

NATTINO, G.; LU, B. Model assisted sensitivity analyses for hidden bias with binary outcomes. **Biometrics**, 2018.

NELDER, J. A.; WEDDERBURN, R. W. M. Generalized linear models. **Journal of the Royal Statistical Society A**, Hoboken, v. 135, n. 3, p. 370–384, 1972.

NETO, V. G.; RIBEIROA, P. R.; DEL-BEMA, L. E.; BERNAL, D. T.; LIMA, C. S. T.; LIGTERINKE, W.; FERNANDEZ, L. G.; CASTRO, R. D. Characterization of the superoxide dismutase gene family in seeds of two *Ricinus communis* L. genotypes submitted to germination under water restriction conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 155, p.453-463, 2018.

NUNES, J. A. R.; MORAIS, A. R.; BUENO FILHO, J. S. S. Modelagem da superdispersão em dados por um modelo linear generalizado misto. **Revista de Matemática e Estatística**, v. 22, n.1, p.55-70, 2004.

ONOFRI, A.; GRESTA, F.; TEI, F. A new method for the analysis of germination and emergence data of weed species. **Weed Research**, v. 50, n.3, p. 187-198, 2010.

PIZÁ, M. C. P.; PREVOSTO, L.; ZILI, C.; CEJAS, E.; KELLY, H.; BALEASTRASSE, K. Effects of non-thermal plasmas on seed-borne *Diaporthe/Phomopsis* complex and germination parameters of soybean seeds. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 49, p.82-91, 2018.

RAHMAN, M. M.; GOVINDARAJULU, Z. A. modification of the test of Shapiro and Wilk for normality. **Journal of Applied Statistics**, v. 24, n. 2, p. 219-236, 1997.

RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. 1. ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 362 p.

RIBEIRO, L. P.; VENDRAMIM, J. D.; BICALHO, K. U.; ANDRADE, M. S.; FERNANDES, J. B.; MORAL, R. A.; DEMÉTRIO, C. G. B. *Annona mucosa* Jacq. (Annonaceae): A promising source of bioactive compounds against *Sitophilus zeamais* Mots. (Coleoptera). **Journal Of Stored Products Research**, v. 55, p.6-14, 2013.

RIZZARDI, D. A.; CONTRERAS-SOTO, R. I.; FIGUEREDO, A. S. T.; ANDRADE, C. A. B.; SANTANA, R. G.; SACAPIM C. A. Generalized mixed linear modeling approach to analyze nodulation in common bean inbred lines. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 52, n.12, p.1178-1184, 2017.

SURIYAGODA, L. D. B.; RYAN, M. H.; LAMBERS, H.; RENTON, M. Comparison of novel and standard methods for analysing patterns of plant death in designed field experiments. **The Journal of Agricultural Science**, v. 150, n. 3, p. 319-334, 2012

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **The annals of statistics**, v. 6, n. 2, p.461-464, 1978.

SILVA, A. R.; DIAS, C. T. S. A. Cophenetic correlation coefficient for Tocher's method. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.48, n.6, p.589-596, 2013.

VILLIERS, T. A. **Ageing and longevity of seeds infield conditions**. In: HEYDECKER, W. (Ed.). Seed ecology. London: The Pennsylvania State University, 1973. p.265-288.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi observado que as metodologias utilizadas na presente dissertação para avaliar a germinação de sementes de milho e soja permitiram a seleção das mesmas cultivares de maior potencial fisiológico. No entanto, a metodologia apresentada no capítulo 1 é passível de críticas quanto à natureza da variável resposta, porcentagem germinação acumulada no tempo, pois podem existir casos que a suposição de normalidade não seja atendida além da ocorrência de autocorrelação residual invalidando dessa forma os resultados, mas caso os pressupostos básicos dos modelos sejam atendidos poderá ser utilizada para prever a qualidade fisiológica de sementes.

A metodologia apresentada no capítulo 2 é considerada a mais adequada para modelar os dados de germinação, tendo em vista que a teoria dos modelos lineares generalizados é mais robusta que os modelos clássicos de regressão e permitem a modelagem de dados considerando outras distribuições de probabilidades como, por exemplo, a binomial.

Estudos futuros deverão ocorrer aplicando principalmente a teoria dos modelos lineares generalizados para prever a germinação e longevidade de sementes considerando diferentes formas de incorporar a presença de sub e superdispersão.

REFERÊNCIAS

- AKAIKE, H. **A new look at the statistical model identification**. I Transactions On Automatic Control, v.19, n.6, p.716-723, 1974.
- ALBERINI, J. L.; MATSUMOTO, M. N.; ZUFFO, N. L. **Cultivares de soja para os estados de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso**. In: SIMPÓSIO SOBRE CULTURA E PRODUTIVIDADE DA SOJA, 1., Piracicaba, 1991. Anais... Piracicaba: FEALQ, 1992. p. 89-108.
- ARGENTA, G.; SANGOI, L.; SILVA, P. R. F.; RAMPAZZO, C.; GRACIETTI, L. C.; STRIEDER, M.; FORSTHOFER, E. L.; SUHRE, E. Potencial de rendimento de grãos de milho em dois ambientes e cinco sistemas de produção. **Scientia Agrária**, v.4, n.1-2, p.27-34, 2003.
- ASSIS, J. P.; DOURADO NET, D.; NASS, L. L.; MANFRON, P. A.; BONNECARRERE, R. A. G.; MARTIN, T. N. Simulação estocástica de atributos do clima e da produtividade potencial de milho utilizando-se distribuição triangular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 539-543, 2006.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL SEED ANALYSTS. **Seed vigor testing handbook**. East Lansing: AOSA, 1983. 93 p.
- BARROS, G. C. O. **Modelos de Previsão da Falência de Empresas: Aplicação empírica ao caso das pequenas e médias empresas portuguesas**. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Departamento de Economia, Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa, Lisboa, Portugal, 2008.
- BELMONT, J.; SÁNCHEZ-CORONADO, M. E.; OSUNA-FERNÁNDEZ, H. R. OROZCO-SEGOVIA, A.; PISANTY, I. Priming effects on seed germination of two perennial herb species in a disturbed lava field in central Mexico. **Seed Science Research**, v.28, n.1, p.63-71, 2018.
- BERLYN, G. P. **Seed germination and morphogenesis**. In: Koslowski, T. T. (ed.). **Seed Biology**. New York: Academic Press, 1972. v. 1, p. 223-312.

BERTI, M. T.; JOHNSON, B. L.; MANTHEY, L. K. Seed physiological maturity in Cuphea. **Industrial Crops and Products**, v. 25, n. 2, p. 190-201, 2007.

BRASIL. Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Levantamento da produção de grãos: safra 2018/19**. Primeiro levantamento, v.6, n.1, 2018.

Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: 07 nov. 2018.

CALHA, I.; MOREIRA, I.; ROCHA, F. Germinação de sementes de populações de orelha-de-mula (*Alisma Plantago-Aquatica*) resistentes e susceptíveis ao bensulfurão-metilo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 31, n. 1, p. 117-130, 2008.

CARVALHO, N. M. **Vigor de sementes**. In: CÍCERO, S. M.; MARCOS FILHO, J.; SILVA, W. R. **Atualização em produção de sementes**. Campinas: Fundação Cargill, 1986. p. 207-223.

CHUNG, G.; SINGH, R.J. Broadening the genetic base of soybean: a multidisciplinary approach. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.27, p.295-341, 2008.

COIMBRA, R. A. **Teste de envelhecimento acelerado em sementes de milho-doce(sh2)**. 2007, 50 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2007.

COOLBEAR, P.; MCGILL, C. R. Effects of a low-temperature pre-sowing treatment on the germination of tomato seed under temperature and osmotic stress. **Scientia Horticulturae**, v. 44, n. 1-2, p. 43-54, 1990.

COPELAND, L. O.; McDONALD, M. B. **Principles of seed science and technology**. 3. ed. New York: Chapman & Hall, 1995. 409 p.

CORDEIRO, G. M.; DEMÉTRIO, C. G. B. **Modelos lineares generalizados e extensões**. Piracicaba, 2008. 493 p.

COUTO, C. A.; SILVA, É. M.; SILVA, A. G.; OLIVEIRA, M. T. P.; VASCONCELOS, J. C.; SILVA, A. R.; SOBREIRA, E. A.; MOURA, J. B. Desempenho de cultivares de milho destinados para produção de milho verde e silagem. **Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 6, n.1, p. 232-251, 2017.

CRUZ, S. J. S. **Características morfofisiológicas de plantas e produtividade do milho**. Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2013, 60 f.

DAIBES, L. F.; CARDOSO, V. J. M. Seed germination of a South American forest tree described by linear thermal time models. **Journal of Thermal Biology**, v. 76, p.156-164, 2018.

DE BEM, C. M.; CARGNELUTTI FILHO, A.; CHAVES, G. G.; KLEINPAUL, J. A.; PEZZINI, R. V.; LAVEZO, A. Gompertz and Logistic Models to the Productive Traits of Sunn Hemp. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 1, p. 225, 2017.

DELOUCHE, J. C.; BASKIN, C. C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seed lots. **Seed Science Technology**, v. 1, n. 2, p. 427-52, 1973.

DEMÉTRIO, C. G. B. **Modelos lineares generalizados em experimentação agrônômica**, 2002. <https://www.researchgate.net/publication/266053942/download>. Acesso em 21 de agosto 2018.

EL-KASSABY, Y. A.; MOSS, I.; KOLOTELO, D.; STOEHR, M. Seed germination: Mathematical representation and parameters extraction. **Forest Science**, v. 54, n. 2, p. 220-227, 2008.

ELLIS, R. H.; ROBERTS, E. H. Improved equations for the prediction of seed longevity. **Annals of Botany**, v.45, n.1, p. 13-30, 1980.

EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.embrapa.gov.br>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

EVANS, M. M. S.; KERMICLE, J. L. Teosinte crossing barrier 1, a locus governing hybridization of teosinte with maize. **Theoretical and Applied Genetics**, v.103, p.259-265, 2001.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 4ª Ed., Livro Ceres Piracicaba, 2004, 360 p.

FIALHO, F. B. Interpretação da curva de crescimento de Gompertz. **Embrapa Suínos e Aves**, p. 1- 4, 1999.

FIESP – **Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Safra Mundial de Milho 2018/19**. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-epublicacoes/safra-mundial-de-milho-2/attachment/file-20180514143657-boletimmilhomaio2018/>>. Acesso em: 06 nov. 2018.

FIGUEIREDO FILHO, L. A. S.; SARMENTO, J. L. R.; CAMPELO, J. E. G.; SANTOS, N. P. S.; SOUSA, J. E. R.; BIAGIOTTI, D. Fatores ambientais e genéticos sobre a curva de crescimento de caprinos mestiços. **Comunicata Scientiae**, v. 3, n. 3, p. 154-161, 2012.

FRANÇA NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A.; PÁDUA, G. P. Tecnologia de produção de soja de alta qualidade. **Informativo ABRATES**, v.20, n.3, p.26-32, 2010.

FREITAS, L.; FILHO, S.; JÚNIOR, J.; SILVA, F. Comparação das funções de ligação Probit e Logit em regressão binária considerando diferentes tamanhos amostrais. **Enciclopédia Biosfera**, v.9, p.16, 2013.

GALINAT, W. C. **The origin of corn**. Pp. 1-47. In *Corn and Corn Improvement*. G. F. Sprague, ed. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA, p.1-47,1977.

GALINAT, W. C. The origin of maize: grain of humanity. New York: **New York Botanical Garden Journal**, v.44, p.3-12, 1995.

GASPAR-OLIVEIRA, C. M.; MARTINS, C. C.; NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C. Duração do teste de germinação de *Brachiaria brizantha* cv. marandu (Hochst. ex A. Rich.) Stapf. **Revista brasileira de sementes**, v. 30, n.3 p. 30-38, 2008.

GAZOLA, S.; SCAPIM, C. A.; GUEDES, T. A.; BRACCINI, A. L. Proposta de modelagem não-linear do desempenho germinativo de sementes de milho híbrido. **Ciência Rural**, v. 41, n. 4, p.551-556, 2011.

GHIASI, H.; LUPI, T. M.; MOKHTARI, M. S. The estimation of genetic parameters for growth curve traits in Raeini Cashmere goat described by Gompertz model. **Small Ruminant Research**, v. 165, p.66-70, 2018.

GRABE, D. F. Measurement of seed vigor. **Journal of Seed Technology**, v. 1, n. 2, p. 18-31, 1976.

HASSE, G. **O Brasil da soja: abrindo fronteiras, semeando cidades**. Porto Alegre: L & PM, 1996.

HATZIG, S. V.; MATTHIAS, F.; BREUER, F.; NESI, N.; DUCOURNAU, S.; WAGNER, M-H. LECKBAND, G.; ABBADI, A.; SNOWDON, R. J. Genome-wide association mapping unravels the genetic control of seed germination and vigor in *Brassica napus*. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p.221, 2015.

HAY, F. R.; MEAD, A.; BLOOMBERG, M. Modelling seed germination in response to continuous variables: use and limitations of Probit analysis and alternative approaches. **Seed Science Research**, v.24, n.3, p.165-186, 2014.

INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION-ISTA. **Handbook of vigour test methods**. 3. ed. Zürich, 1995. 117 p.

JOOSEN, R. V. L.; KODDE, J.; WILLEMS, L. A. J.; LIGTERINK, W. Germinator: A software package for high-throughput scoring and curve fitting of *Arabidopsis* seed germination. **Plant Journal**, v. 62, n. 1, p. 148–159, 2010.

KASTER, M; MENOSSO, O. G. **Cultivares de soja para o estado do Paraná**. In: SIMPÓSIO SOBRE CULTURA E PRODUTIVIDADE DE SOJA, 1., 1991, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, 1992. p. 119-128.

KIIHL, R. D. S.; MIRANDA, L.; DOMIT, L.; LANDGRAF, L.; DALL'AGNOL, A.; VIEIRA, soja brasileira: sucesso de norte a sul. **Embrapa Soja-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, 2003.

KIIHL, R. A. S.; ALMEIDA, L. A. **Situação atual e perspectivas do melhoramento genético da soja no Brasil**. In: SIMPÓSIO SOBRE CULTURA E PRODUTIVIDADE DA SOJA, 1., 1991, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, 1992. p. 38-40.

KÜPPER, A.; BORGATO, E. A.; PARTTERSON, E. L.; NETTO, A. G.; NICOLAI, M.; CARVALHO, S. J. P.; NISSEM, S. J.; GAINES, T. A.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Multiple Resistance to Glyphosate and Acetolactate Synthase Inhibitors in Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) Identified in Brazil. **Weed Science**, v. 65, n. 03, p.317-326, 2017.

LEPRINCE, O.; PELLIZZARO, A.; BERRIRI, S.; BUITINK, J. Late seed maturation: drying without dying. **Journal of Experimental Botany**, v.68, n.4, p.827-841, 2017.

LIMA, A. F. **Potencial bioativo e investigações químicas de Solanaceae em relação a *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera: Noctuidae)**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LISKA, G. R.; SILVEIRA, E. C.; REIS, P. R.; CIRILLO, M. Â.; GONZALEZ, G. G. H. Seleção de um modelo de regressão binomial para taxa de predação de *Euseius concordis* (Chant, 1959). **Coffee Science**, v. 10, n. 1, p. 113-121, 2015.

MALLET, J. The evolution of insecticide resistance: have the insects won? **Trends Ecol Evo**, v.4, n.11, p.336-340, 1989.

MARCOS FILHO, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v.72, n.4, p.363-374, 2015a.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Piracicaba, Fealq, 2015b, 659 p.

MARTIN, N. B. **Commodities: Mercados com alta volatilidade em abril**. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 2005. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=2249>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

MATTHEWS, S.; NOLI, E.; DEMIR, I.; KHAJEH-HOSSEINI, M.; WAGNER, M.-H. Evaluation of seed quality: from physiology to international standardization. **Seed Science Research**, v.22, p. S69-S73, 2012.

McCULLAGH, P.; NELDER, J. A. **Generalized linear models**, Londres: Chapman and hall, 1989. 511p.

McDONALD, J. R. M. B. A review and evaluation of seed vigor tests. **Association. Off Seed Analysis**, v. 65, p. 109 - 139, 1975.

MIRANDA, M. C. A. **Cultivares de soja para o estado de São Paulo**. In: SIMPÓSIO SOBRE CULTURA E PRODUTIVIDADE DA SOJA, 1. Piracicaba, 1991. Anais. Piracicaba: FEALQ, 1992, p.109-118.

MORAL, R. A.; HINDE, J.; DEMÉTRIO, C. G. B. Half-Normal Plots and Overdispersed Models in R: The hnp Package. **Journal of Statistical Software**, v. 81, n. 10, p. 1-23, 2017.

MURPHEY, M.; KOVACH, K.; ELNACASH, T.; HE, H.; BENTSINK, L.; DONOHUE, K. DOG1-imposed dormancy mediates germination responses to temperature cues. **Environmental And Experimental Botany**, v. 112, p.33-43, 2015.

NATTINO, G.; LU, B. Model assisted sensitivity analyses for hidden bias with binary outcomes. **Biometrics**, 2018.

NELDER, J. A.; WEDDERBURN, R. W. M. Generalized linear models. **Journal of the Royal Statistical Society A**, Hoboken, v. 135, n. 3, p. 370–384, 1972.

NETO, V. G.; RIBEIROA, P. R.; DEL-BEMA, L. E.; BERNAL, D. T.; LIMA, C. S. T.; LIGTERINKE, W.; FERNANDEZ, L. G.; CASTRO, R. D. Characterization of the superoxide dismutase gene family in seeds of two *Ricinus communis* L. genotypes submitted to germination under water restriction conditions. **Environmental and Experimental Botany**, v. 155, p.453-463, 2018.

NUNES, J. A. R.; MORAIS, A. R.; BUENO FILHO, J. S. S. Modelagem da superdispersão em dados por um modelo linear generalizado misto. **Revista de Matemática e Estatística**, v. 22, n.1, p.55-70, 2004.

OLIVEIRA JÚNIOR, L. F. G.; DELIZA, R.; BRESSAN-SMITH, R.; PEREIRA, M. G.; CHIQUIERE, T. B. Seleção de genótipos de milho mais promissores para o consumo *in natura*. **Ciência de Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 01, p. 159-165, 2006.

ONOFRI, A.; GRESTA, F.; TEI, F. A new method for the analysis of germination and emergence data of weed species. **Weed Research**, v. 50, n.3, p. 187-198, 2010.

ONWIMOL, D.; CHANPRAME, S.; THONGKET, T. Arrest of cell cycle associated with delayed radicle emergence in deteriorated cucumber seed. **Seed Science and Technology**, v.40, p.238-247, 2012.

PIZÁ, M. C. P.; PREVOSTO, L.; ZILI, C.; CEJAS, E.; KELLY, H.; BALEASTRASSE, K. Effects of non-thermal plasmas on seed-borne *Diaporthe/Phomopsis* complex and germination parameters of soybean seeds. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 49, p.82-91, 2018.

RAO, N. K.; DULLOO, M. E.; ENGELS, J. M. M. A review of factors that influence the production of quality seed for long-term conservation in gene banks. **Genetic Resources & Crop Evolution**, v. 64, p.1061-1074, 2017.

RITZ, C. Toward a unified approach to dose-response modeling in ecotoxicology. **Environmental Toxicology And Chemistry**, v. 29, n. 1, p.220-229, 2010.

RITZ, C.; PIPPER, C. B.; STREIBIG, J. C. Analysis of germination data from agricultural experiments. **European Journal of Agronomy**, v. 45, p. 1-6, 2013.

SANGOI, L.; ARGENTA, G.; SILVA, R. R. F; MINETTO, T. J.; BISOTO, V. Níveis de manejo na cultura do milho em dois ambientes contrastantes: análise técnico-econômica. **Ciência Rural**, v. 33, p.1021-1029, 2003.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **The annals of statistics**, v. 6, n. 2, p.461-464, 1978.

SEDIYAMA, T. **Melhoramento de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na Universidade Federal de Viçosa**. In: SIMPÓSIO SOBRE CULTURA E PRODUTIVIDADE DA SOJA, 1., Piracicaba, 1991. Anais... Piracicaba: FEALQ, 1992. p.82-88.

SILVA, N. O. **Controle genético de características associadas à qualidade de sementes de milho**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras: UFLA, 2006, 92 p.

VAZ BISNETA, M. **Influence of stem termination on soybeans morphological characteristics**. 2015. 76 f. Dissertation (Master in Genetics and Plant Breeding)– Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, 2015.

VELLO, N. A. **Ampliação da base genética do germoplasma e melhoramento de soja na ESALQ/USP.** In: SIMPÓSIO SOBRE A CULTURA E PRODUTIVIDADE DA SOJA, 1. Piracicaba, 1991. Anais... Piracicaba, FEALQ, 1992. p. 60-81.

VIEIRA, R. D.; CARVALHO, N. M. **Testes de vigor em sementes.** Jaboticabal: FUNEP, 1994. 164 p.

WHITE, S.E.; DOEBLEY, J.F. Of genes and genomes and the origin of maize. **Trends in Genetics**, v.14, n. 8, 1998.

APÊNDICE A – Teste de identidade de modelos tendo em vista os parâmetros da curva de Gompertz para as cultivares de milho e soja.

Tabela 12 - Identidade de modelos não lineares utilizando a curva de Gompertz para avaliar a germinação das cultivares de milho: AS 1633 PRO3 e 2A401PW.

Cultivar	Parâmetros	Modelos ¹							
		Ω	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7
AS 1633 PRO3	A ₁	76,89	-	75,92	80,12	-	-	78,52	-
	B ₁	0,15	0,11	-	0,13	-	0,10	-	-
	C ₁	47,02	48,17	46,96	-	48,04	-	-	-
2A401PW	A ₂	93,48	-	94,31	91,90	-	-	92,79	-
	B ₂	0,19	0,26	-	0,19	-	0,29	-	-
	C ₂	50,53	49,77	50,57	-	49,63	-	-	-
Comum	A	-	85,68	-	-	85,16	86,00	-	85,55
	B	-	-	0,17	-	0,16	-	49,05	0,15
	C	-	-	-	49,31	-	49,30	0,16	48,90
SQR (nσ^2)²		74,94	331,70	90,69	232,80	508,60	369,30	263,40	545,50
χ^2 calculado³			32,73	4,20	24,94	42,13	35,09	27,65	43,67
χ^2 tabelado⁴			3,84	3,84	3,84	5,99	5,99	5,99	7,81
$P(\chi^2 \text{ tab} > \chi^2 \text{ calc})^5$			<0,0001	0,04	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Decisão em relação H_{0i}			Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita

¹ ω_1 a ω_7 ajustados de acordo com as hipóteses H₀₁ a H₀₇, respectivamente; ² Soma de quadrados dos resíduos provenientes da Anova gerada pelo procedimento NLIN do SAS (n=22); ³ χ^2 calculado = - n.ln (SQR _{Ω} / SQR _{ω_i}); ⁴ χ^2 tabelado (α ; p Ω -p ω); ⁵ $P(\chi^2 \text{ tab} > \chi^2 \text{ calc})$ = nível de significância do teste.

Tabela 13 - Identidade de modelos não lineares utilizando a curva de Gompertz para avaliar a germinação das cultivares de milho: AL Bandeirante e BRS 4103.

Cultivar	Parâmetros	Modelos ¹							
		Ω	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7
AL Bandeirante	A ₁	98,16	-	102,30	99,35	-	-	103,50	-
	B ₁	0,19	0,18	-	0,19	-	0,18	-	-
	C ₁	33,22	33,42	33,35	-	33,24	-	-	-
BRS 4103	A ₂	106,10	-	100,10	103,50	-	-	99,06	-
	B ₂	0,12	0,13	-	0,12	-	0,13	-	-
	C ₂	34,23	33,86	34,14	-	34,30	-	-	-
Comum	A	-	101,10	-	-	101,30	100,00	-	101,40
	B	-	-	0,02	-	0,15	-	0,15	0,15
	C	-	-	-	33,56	-	33,57	33,68	33,69
SQR (no²)²		171,30	194,90	246,20	190,40	250,10	199,80	258,80	284,90
χ^2 calculado³			2,32	6,53	1,90	6,81	2,77	7,43	9,16
χ^2 tabelado⁴			3,84	3,84	3,84	5,99	5,99	5,99	7,81
$P(\chi^2 \text{ tab} > \chi^2 \text{ calc})^5$			0,1275	0,0106	0,1678	0,0332	0,2503	0,0244	0,0273
Decisão em relação H_{0i}			Aceita	Rejeita	Aceita	Rejeita	Aceita	Rejeita	Rejeita

¹ ω_1 a ω_7 ajustados de acordo com as hipóteses H₀₁ a H₀₇, respectivamente; ² Soma de quadrados dos resíduos provenientes da Anova gerada pelo procedimento NLIN do SAS (n=18); ³ χ^2 calculado = $-\ln(SQR_{\Omega}/SQR_{\omega_i})$; ⁴ χ^2 tabelado ($\alpha; p, \Omega-p, \omega$); ⁵ $P(\chi^2 \text{ tab} > \chi^2 \text{ calc})$ = nível de significância do teste.

Tabela 14 - Identidade de modelos não lineares utilizando a curva de Gompertz para avaliar a germinação das cultivares de soja: CD2737 RR e CD2857 RR.

Cultivares	Parâmetros	Modelos ¹							
		Ω	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7
CD2737 RR	A ₁	98,08	-	98,83	102,50	-	-	106,50	-
	B ₁	0,21	0,21	-	0,20	-	0,24	-	-
	C ₁	23,88	23,89	23,82	-	23,78	-	-	-
CD2857 RR	A ₂	98,66	-	98,26	96,04	-	-	95,55	-
	B ₂	0,18	0,18	-	0,14	-	0,13	-	-
	C ₂	29,69	29,67	29,75	-	29,78	-	-	-
Comum	A	-	98,43	-	-	98,46	97,97	-	98,64
	B	-	-	0,19	-	0,19	-	0,16	0,17
	C	-	-	-	26,18	-	25,98	26,50	26,47
SQR (nσ^2)²		31,88	32,57	41,13	1036,90	41,81	1099,70	1080,90	1359,30
χ^2 calculado³			0,45	5,35	72,67	5,70	74,36	74,00	78,81
χ^2 tabelado⁴			3,84	3,84	3,84	5,99	5,99	5,99	7,81
$P(\chi^2 \text{ tab} > \chi^2 \text{ calc})$⁵			0,5026	0,0207	<0,0001	0,0579	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Decisão em relação H_{0i}			Aceita	Rejeita	Rejeita	Aceita	Rejeita	Rejeita	Rejeita

¹ ω_1 a ω_7 ajustados de acordo com as hipóteses H₀₁ a H₀₇, respectivamente; ² Soma de quadrados dos resíduos provenientes da Anova gerada pelo procedimento NLIN do SAS (n=18); ³ χ^2 calculado = $-\ln(SQR_{\Omega}/SQR_{\omega_i})$; ⁴ χ^2 tabelado ($\alpha; p\Omega-p\omega$); ⁵ $P(\chi^2 \text{ tab} > \chi^2 \text{ calc})$ = nível de significância do teste.

APÊNDICE B – Gráficos para as diferentes funções de ligação utilizadas para descrever a germinação das cultivares de milho e soja.

Figura 5 - Representação das funções de ligação para as cultivares de milho: Logit (A), (B) e (C) e Probit (D).

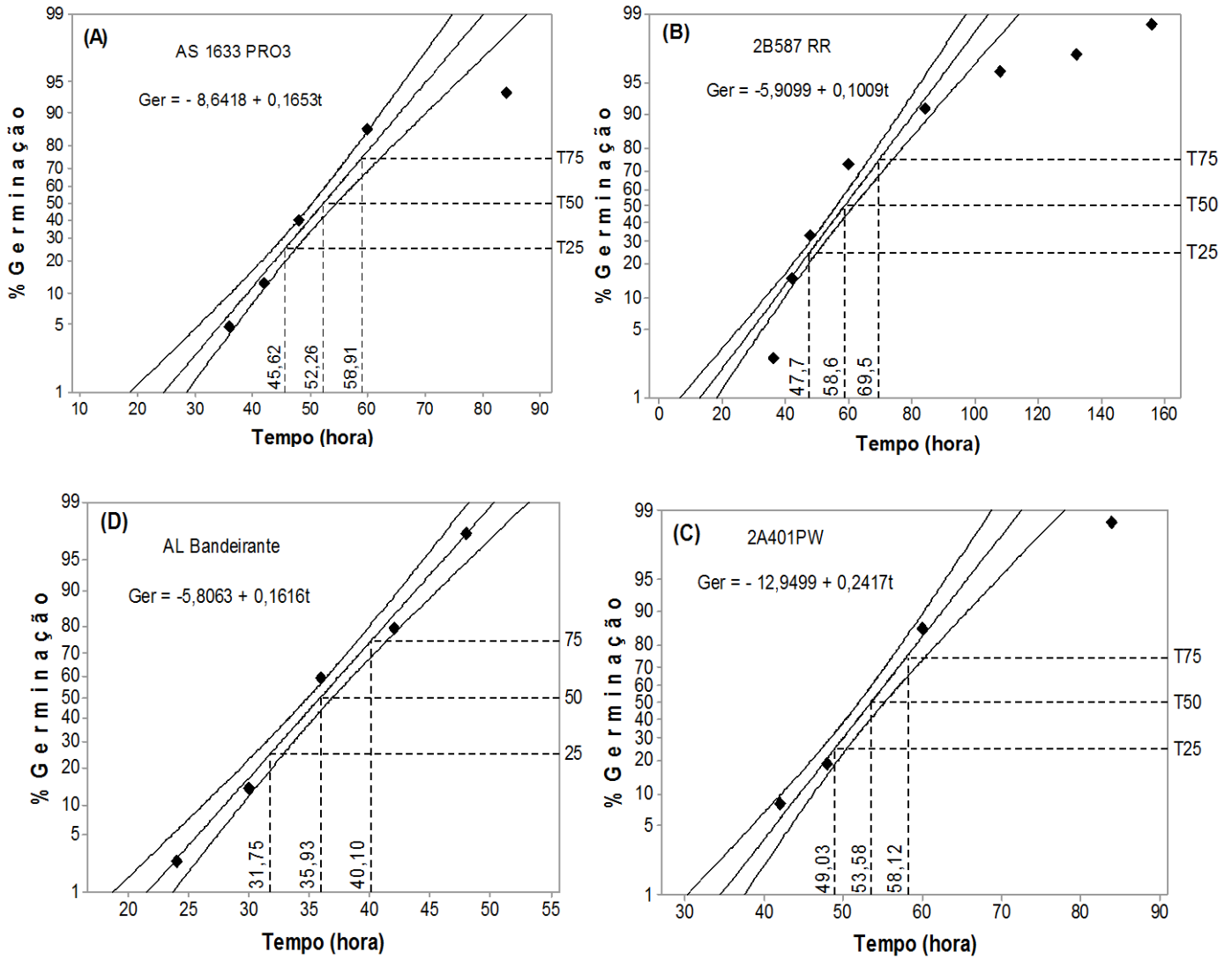


Figura 6 - Representação das funções de ligação para as cultivares de soja: Probit (A) e Logit (B), (C), (D) e (E).

