

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GUSTAVO HENRIQUE DE SOUZA MORELI

**VALIDAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DE COMPOSTOS
MULTIGENOTÍPICOS E SELEÇÃO DE LINHAGENS DE SOJA PARA PLANTIOS
MULTIGENOTÍPICOS**

Ilha Solteira
2025

GUSTAVO HENRIQUE DE SOUZA MORELI

**VALIDAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DE COMPOSTOS
MULTIGENOTÍPICOS E SELEÇÃO DE LINHAGENS DE SOJA PARA PLANTIOS
MULTIGENOTÍPICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo

Prof. Dr. Bruno Ettore Pavan
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

M839v Moreli, Gustavo Henrique de Souza.
Validação de modelos de predição de compostos multigenotípicos e seleção de linhagens de soja para plantios multigenotípicos / Gustavo Henrique de Souza Moreli. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
31 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2025

Orientador: Bruno Ettore Pavan
Inclui bibliografia

1. Competição. 2. Intergenotípica. 3. *Glycine max* (L) Merrill. 4. Misturas de cultivares. 5. Modelagem genética. 6. Produtividade da soja.

Elaborada por Raiane da Silva Santos - CRB-8/9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" FACULDADE
DE ENGENHARIA – UNESP – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA CURSO DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA AGRONÔMICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: "VALIDAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DE COMPOSTOS
MULTIGENOTÍPICOS E SELEÇÃO DE LINHAGENS DE SOJA PARA PLANTIOS
MULTIGENOTÍPICO".

ALUNA: GUSTAVO HENRIQUE DE SOUZA MORELI - RA: 222052211
ORIENTADOR: BRUNO ETTORE PAVAN

Aprovado (x) Reprovado () pela Comissão Examinadora com nota obtida: 9,25 (nove e vinte e
cinco centésimos)

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br BRUNO ETTORE PAVAN
Data: 15/12/2025 09:15:00-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Ettore Pavan (Orientador)
DFTASE- Unesp -Câmpus Ilha Solteira

Documento assinado digitalmente
gov.br EDSON LAZARINI
Data: 16/12/2025 18:12:06-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Edson Lazarini
DFTASE- Unesp - Câmpus Ilha Solteira

Documento assinado digitalmente
gov.br ADOLAR FREITAS JUNIOR
Data: 15/12/2025 08:21:16-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Adolar Freitas Junior (Gerente de Projetos em Breeding-BAYER)
Doutor em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas, Universidade Federal de Viçosa-UFV)

Documento assinado digitalmente
gov.br GUSTAVO HENRIQUE DE SOUZA MORELI
Data: 16/12/2025 21:48:52-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Gustavo Henrique de Souza Moreli
Discente

Ilha Solteira (SP), 12 de dezembro de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, por me conceder força e sabedoria ao longo desta caminhada. À minha namorada, por estar ao meu lado em todos os momentos, oferecendo apoio e incentivo. E à minha mãe, por acreditar em mim e apoiar cada uma das minhas escolhas durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Grupo de Estudo em Melhoramento de Plantas, de Valdecir Alves de Souza e da equipe da FEPE – Cerrado. Agradeço a Pro Reitoria de Pesquisa pela Bolsa para a realização deste trabalho. Agradeço a empresa BASF pelo fornecimento de materiais e financiamento para a realização deste trabalho.

"O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos
dia após dia." - Robert Collier

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo validar modelos estatísticos para predição de compostos multigenotípicos e selecionar combinações de linhagens de soja para utilização em sistemas de plantio que incorporam diversidade genética. O estudo foi conduzido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP, em Selvíria-MS, avaliando 18 genótipos sob condições de auto e alocompetição. Utilizou-se o delineamento de competição proposto por Perecin et al. (1997) em associação ao modelo dialélico parcial de Geraldi e Miranda Filho (1988), permitindo estimar capacidades gerais e específicas de exercer e tolerar competição entre genótipos. As análises revelaram ampla variabilidade competitiva, indicando forte influência da competição intergenotípica sobre a produtividade. Observou-se incremento médio de até 13% na produtividade em condições de alocompetição quando comparada à autocompetição, evidenciando efeitos complementares entre genótipos distintos. As predições dos compostos C50 e C67 mostraram que determinadas combinações apresentaram desempenho superior ao de seus componentes isolados, indicando maior eficiência no uso dos recursos do ambiente e maior estabilidade produtiva em sistemas mistos. Os resultados confirmam o potencial dos compostos multigenotípicos como estratégia para elevar produtividade, estabilidade e resiliência da cultura da soja. A integração entre modelagem genética, análise de competição e predição de combinações permite identificar misturas com alto grau de complementaridade, contribuindo para sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

Palavras-chave: Competição intergenotípica, *Glycine max* (L) Merrill, Misturas de Cultivares, Modelagem Genética, Produtividade da Soja.

ABSTRACT

This study aimed to validate statistical models for predicting multigenotypic soybean composites and to select combinations of lines suitable for genetically diverse planting systems. The research was carried out at the Teaching, Research, and Extension Farm of UNESP in Selvíria, MS, using 18 genotypes evaluated under self-competition and allocompetition conditions. The experimental design proposed by Perecin et al. (1997), combined with the partial diallel model of Geraldi and Miranda Filho (1988), enabled the estimation of general and specific abilities related to exerting and tolerating intergenotypic competition. The analyses revealed substantial genetic variability in competitive behavior, demonstrating that intergenotypic interaction significantly affects yield performance. Allocometric effects led to yield increases of up to 13% compared with self-competition, indicating strong complementarities among distinct genotypes. Predictions of the C50 and C67 composite types showed that specific genotype combinations outperformed their respective monocultures, suggesting enhanced resource-use efficiency and greater production stability under mixed-stand systems. The results confirm the potential of multigenotypic composites as an effective strategy to improve soybean productivity, stability, and resilience. Integrating genetic modeling, competition analysis, and predictive tools facilitates the identification of highly complementary mixtures, contributing to more sustainable and efficient agricultural systems.

Keywords: Inter-genotypic Competition, *Glycine max* (L.) Merrill, Cultivar Mixtures, Genetic Modeling, Soybean Yield.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1.	A CULTURA DA SOJA.....	16
2.2.	MELHORAMENTO DA SOJA	17
2.3.	PLANTIOS MULTIGENOTÍPICOS.....	19
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1.	DELINEAMENTO E MODELO.....	21
3.2.	APLICAÇÃO PRÁTICA.....	23
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
5.	CONCLUSÃO.....	36

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro representa um dos principais pilares da economia nacional, correspondendo a aproximadamente 29,4% do Produto Interno Bruto (PIB), segundo dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2025). Esse setor exerce papel fundamental na balança comercial do país, consolidando-se como responsável por parcela significativa das exportações brasileiras. Entre as principais culturas produzidas e comercializadas, a soja se destaca, sendo a commodity agrícola de maior relevância econômica. Para a safra 2024/25, estima-se uma produção nacional de 169 milhões de toneladas, cultivadas em uma área de 47,4 milhões de hectares, dos quais cerca de 99% correspondem a lavouras transgênicas (USDA, 2024; CROPLIFE BRASIL, 2024).

No caso específico da soja, um dos principais entraves enfrentados pelos programas de melhoramento genético é a estreita base genética da cultura. Diversos estudos demonstraram que apenas um número reduzido de acessos tem contribuído de forma significativa para a composição gênica das cultivares atualmente utilizadas, o que reflete uma diversidade genética limitada em germoplasmas elite de soja (MULATO, 2009). Essa limitação acarreta dificuldades na obtenção de ganhos expressivos em produtividade e resistência, além de aumentar a suscetibilidade das cultivares a pragas e agentes patogênicos, restringindo o avanço genético e a estabilidade produtiva. Dessa forma, torna-se evidente que a limitação genética representa um desafio direto à manutenção e ao aumento da produtividade no campo.

Adicionalmente, a predominância de plantios monogenotípicos — compostos por extensas áreas cultivadas com um único genótipo — agrava essa vulnerabilidade, resultando em populações geneticamente homogêneas e mais propensas a perdas em função de estresses bióticos e abióticos. Assim, torna-se essencial o desenvolvimento de estratégias de manejo e de melhoramento que minimizem riscos produtivos e contribuam para a sustentabilidade econômica dos produtores, assegurando o abastecimento agrícola e reduzindo a vulnerabilidade genética da cultura (NASS et al., 2001; BOREM, 2005; VESCOVSKY, BARRIGA, 1994; RAMALHO et al., 1993, 2001). Nesse contexto, a busca por alternativas que aumentem a diversidade e reduzam os riscos torna-se cada vez mais necessária.

Nesse contexto, autores como Martins et al. (2014) e Moura (2009) têm discutido a viabilidade de plantios comerciais com misturas genotípicas, como alternativa à uniformidade genética dos sistemas convencionais. A adoção de

misturas genóticas pode proporcionar maior estabilidade produtiva frente às variações ambientais, uma vez que o baixo desempenho de determinado genótipo em certas condições pode ser compensado pelo desempenho superior de outro, resultando em uma produtividade média mais elevada (HELLAND; HOLLAND, 2001). Além disso, as diferenças entre genótipos quanto à resistência a pragas e doenças podem contribuir para a redução da vulnerabilidade genética dos cultivos (BRUZI et al., 2007). Assim, as misturas surgem como estratégia funcional para aumentar resiliência e produtividade.

Outra vantagem na utilização de misturas genóticas está associada ao aumento de produtividade decorrente da alocompetição (Donald, 1963). Como as plantas de diferentes genótipos apresentam exigências fisiológicas distintas, a competição intergenotípica tende a ser menos intensa, favorecendo o particionamento de recursos. Segundo a hipótese proposta por Boyden, Binkley e Stape (2008), quanto maiores forem as diferenças genéticas entre plantas vizinhas, maior será o potencial de particionamento e menor o efeito deletério da competição. Dessa maneira, o desempenho produtivo das misturas depende diretamente da natureza das interações competitivas entre seus componentes.

Considerando que a competição influencia o desempenho dos genótipos de forma diferenciada, a adoção de misturas genóticas deve levar em conta o grau de alocompetição entre as plantas (PAVAN et al., 2012; MARTINS et al., 2014). Quando os prejuízos que um genótipo causa sobre si próprio são superiores aos danos que impõe a outro genótipo distinto, ambos podem coexistir de maneira equilibrada em um mesmo ambiente (McNAUGHTON; WOLF, 1973). No entanto, a seleção adequada dos genótipos que comporão as misturas é um fator determinante para o sucesso do plantio multigenotípico, sendo fundamental a estimação de parâmetros genéticos relacionados à capacidade de exercer e tolerar a competição, de modo a prever os impactos sobre a produtividade. Isso evidencia a necessidade de ferramentas eficientes para estimar essas interações.

Assim, a estimação correta de parâmetros associados à competição é fundamental para a seleção dos melhores mixes de plantios, e ao mesmo tempo não existem modelos de seleção para compostos em soja, o que torna essencial a validação de um modelo eficiente que capte os efeitos benéficos e maléficos da competição sobre os diferentes cultivares de soja. Desta forma, este trabalho objetivou

validar modelo de estimação de componentes da competição e seleção de mix de cultivares para diferentes compostos na cultura da soja.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura da soja

A soja (*Glycine max* L. Merr.) é uma leguminosa anual de elevada relevância mundial, tanto do ponto de vista agrônomo quanto socioeconômico. Originária da Ásia Oriental — especialmente das regiões da China, Coreia e Japão —, a soja domesticada descende de sua forma selvagem (*Glycine soja*), tendo sido objeto de seleção humana que favoreceu vagens não-deiscentes, grãos maiores, menor dormência e alteração fenológica para adaptação às condições de cultivo (FAO, 2024).

Botanicamente, pertence à família Fabaceae, possui raízes pivotantes capazes de formar nódulos rizobiais que realizam fixação biológica de nitrogênio quando inoculadas com bactérias compatíveis, contribuindo para a fertilidade do solo. Sua morfologia inclui folhas trifolioladas, caule que pode ser determinado ou indeterminado, inflorescências axilares com pequenas flores e vagens contendo de 2 a 4 sementes.

Do ponto de vista fenológico, o ciclo da soja é bem caracterizado por estádios vegetativos (V) e reprodutivos (R): inicia com a emergência, passa por crescimento vegetativo (V1, V2 ...), florescimento (R1–R2), enchimento de grãos (R3–R6) e maturidade fisiológica (R7–R8). O desenvolvimento depende fortemente de fatores como fotoperíodo, temperatura e disponibilidade hídrica: muitas cultivares são sensíveis à duração do dia, e estresses de temperatura ou seca nas fases de florescimento e enchimento causam perdas significativas de rendimento.

Em termos de produção, a soja figura entre as principais commodities agrícolas globais. Segundo dados da USDA/FAS, a produção mundial de soja para o ano-safra de 2024/25 está estimada em 420,87 milhões de toneladas, um crescimento de 33% em relação à média dos 10 anos anteriores (USDA/FAS, 2025). Os maiores produtores são o Brasil (169,0 milhões de toneladas), os EUA (118,84 milhões) e a Argentina (49,0 milhões) (USDA/FAS, 2025). No Brasil, a área plantada de soja tem crescido; para a temporada 2025/26 está projetada em cerca de 49,1 milhões de hectares, segundo o USDA, impulsionada pela alta demanda global e por ganhos de produtividade (eFeedLink, 2025; USDA FAS, 2025).

Socioeconomicamente, a soja sustenta cadeias de valor vitais: é base para a produção de farelo proteico (usado em rações animais), óleo vegetal, alimentos humanos (proteínas, isolados), além de biocombustíveis. No relatório de mercado da International Institute for Sustainable Development, o setor global da soja foi avaliado em cerca de US\$ 155 bilhões em 2024, com projeção para atingir US\$ 278 bilhões até 2031 (Voorra et al., 2024). Contudo, menos de 3% da produção mundial está certificada por padrões de sustentabilidade voluntária, o que indica grandes desafios ambientais (Voorra et al., 2024).

Nesse contexto, o melhoramento de plantas torna-se absolutamente estratégico para assegurar a relevância contínua da soja. Programas de melhoramento visam melhorar o rendimento potencial, aumentar a estabilidade produtiva frente a variabilidades climáticas, desenvolver resistência a pragas e doenças e incorporar tolerância a estresses abióticos, como seca e salinidade. Além disso, busca-se otimizar a qualidade do grão (teor de proteína, perfil lipídico) para atender mercados industriais diversos, utilizando ferramentas modernas — como a seleção assistida por marcadores e a seleção genômica — que têm ampliado a eficiência dos programas de melhoramento (EMBRAPA, 2024).

2.2. Melhoramento da Soja

Assim como em outras culturas, a preservação dos recursos genéticos foi essencial para o avanço do melhoramento, pois a ampla variabilidade encontrada em populações tradicionais e espécies relacionadas possibilitou a expansão da soja para diferentes ambientes ao redor do mundo.

A conservação de germoplasma, tanto *in situ* quanto *ex situ*, é fundamental para assegurar a continuidade dos programas de melhoramento. Essa diversidade permite a seleção de genótipos mais adaptados a novas condições edafoclimáticas, além de favorecer a obtenção de cultivares com maior eficiência produtiva, tolerância a estresses e melhor qualidade de grãos (Teixeira e Trindade, 2021). No caso da soja, grandes avanços obtidos nas últimas décadas estão diretamente relacionados ao uso estratégico desses recursos genéticos.

Segundo Specht et al. (1999), entre 50% e 70% dos ganhos de produtividade na soja resultam do melhoramento genético. Observou-se um crescimento significativo e constante na produtividade desde a década de 1960, acompanhando o desenvolvimento de cultivares mais precoces, mais tolerantes ao acamamento,

resistentes a doenças e mais eficientes no uso de recursos ambientais. Mudanças fenotípicas, como plantas mais compactas e maior capacidade de adaptação a diferentes latitudes, possibilitaram a expansão da cultura para regiões como o Cerrado brasileiro.

As técnicas agrícolas também passaram por profundas transformações. O avanço da mecanização, o desenvolvimento de sistemas conservacionistas como o plantio direto, a melhoria dos inoculantes bacterianos e a evolução das tecnologias de sementes contribuíram para a consolidação da soja como uma das culturas mais importantes do mundo (Galvão, 2014). Com isso, as características desejáveis nas cultivares também se modificaram, incluindo maior estabilidade produtiva, resistência a pragas e doenças e, mais recentemente, tecnologias de transgenia como RR e Intacta, voltadas ao controle de plantas daninhas e insetos (Embrapa, 2024).

A exemplo do milho com seus híbridos, a soja também passou por modernizações na forma de produção e distribuição de cultivares. Embora a soja não utilize híbridos comerciais devido ao seu sistema reprodutivo predominantemente autógamo, empresas investem em linhagens altamente puras e em programas de melhoramento baseados em seleção recorrente e uso de marcadores moleculares, garantindo cultivares cada vez mais adaptadas a nichos específicos (Borém, 2017). Esse avanço permitiu ganhos expressivos em produtividade e estabilidade ao longo dos anos.

Entretanto, pragas e doenças têm se tornado desafios cada vez maiores para a cultura. A ocorrência de ferrugem asiática, percevejos e doenças de final de ciclo gera perdas significativas, conforme relatado pela Embrapa Soja (2023), que destaca o crescente impacto desses agentes na redução da produtividade e na elevação dos custos de manejo. Embora novas cultivares com maior resistência sejam constantemente lançadas, a rápida evolução dos patógenos, associada a práticas inadequadas de manejo, acaba reduzindo a eficiência de genes de resistência (Oliveira, 2018). Com isso, há a necessidade recorrente de novas tecnologias, o que eleva custos de produção e demanda estratégias mais sustentáveis.

Apesar dos avanços no melhoramento genético, fatores como pressão de pragas, evolução de doenças e instabilidades climáticas ainda geram incertezas. Assim, estratégias como o aumento da diversidade genética nos sistemas produtivos, o uso de cultivares com diferentes grupos de maturação e a rotação de culturas

tornam-se essenciais para reduzir riscos, aumentar a resiliência e garantir produtividade, sustentabilidade e segurança alimentar.

2.3. Plantios multigenotípicos

A competição entre plantas tem papel crucial na definição da produtividade da soja, especialmente em sistemas modernos que buscam maior eficiência por área. Estudos ecológicos demonstram que a diversidade genética dentro de uma cultura pode alterar significativamente as interações competitivas, influenciando a exploração de recursos e a estabilidade produtiva (Finckh, Gacek, Goyeau et al., 2000). Tilman (1997) argumenta que comunidades diversificadas tendem a utilizar os recursos do ambiente de forma mais eficiente, seja por complementação funcional, seja por diferenças no uso de nichos ecológicos. No caso da soja, genótipos distintos podem apresentar diferentes estratégias de crescimento, arquitetura foliar e padrões de absorção de nutrientes, o que possibilita efeitos positivos de facilitação entre plantas.

A resposta competitiva em cultivos multigenotípicos depende fortemente das características intrínsecas de cada cultivar. Segundo Board e Kahlon (2012), parâmetros como interceptação de luz, plasticidade foliar e eficiência no uso de nitrogênio determinam o desempenho da soja sob estresse competitivo. Assim, misturas eficientes devem reunir genótipos não redundantes, com traços fisiológicos complementares, permitindo melhor aproveitamento do ambiente. No entanto, a seleção de combinações ideais ainda é limitada pela falta de protocolos robustos e pela compreensão incompleta dos mecanismos ecofisiológicos envolvidos.

Com o avanço das técnicas de cultivo e a redução dos espaçamentos ao longo das últimas décadas, a soja moderna tornou-se menos agressiva competitivamente, favorecendo genótipos com maior eficiência fotossintética e menor investimento em estruturas de competição (Specht; Hume; Kumudini, 1999). Cultivares antigas tendiam a apresentar maior estatura e maior sombreamento, o que aumentava a competição intraespecífica; já genótipos atuais são mais compactos e apresentam maior estabilidade produtiva em altas densidades. Isso implica que cultivares modernas podem se beneficiar ainda mais do plantio em misturas, desde que apresentem compatibilidade morfológica (BOARD; KAHLON, 2012; ASSEFA et al., 2019; DONALD, 1963)

Estudos recentes reforçam que genótipos de soja respondem de maneiras distintas quando submetidos a ambientes contrastantes. Zhang et al. (2020), ao avaliarem cultivares sob diferentes regimes de nitrogênio, observaram diferenças claras nas estratégias de alocação de biomassa e no desenvolvimento radicular, indicando que misturas podem apresentar respostas complexas, dependendo do ambiente de cultivo e da disponibilidade de nutrientes. Essa variabilidade abre espaço para ganhos potenciais quando genótipos contrastantes são combinados.

A competição entre genótipos geneticamente distantes tende a ser menor devido ao particionamento de recursos, conforme observado por Binkley, Stape e Ryan (2004). Quanto mais diferentes as plantas em suas exigências fisiológicas, menor a sobreposição de nichos e, conseqüentemente, menos intensa a competição direta. Em soja, diferenças em ciclo, hábito de crescimento, profundidade radicular e arquitetura de dossel ampliam a chance de complementariedade em consórcios intraespecíficos.

Apesar disso, nem sempre misturas superam monocultivos em produtividade. Em diversos estudos, o desempenho dos cultivos multigenotípicos depende do ambiente e da combinação utilizada. Mudrak et al. (2021) registraram que misturas de cultivares de soja apresentaram maior estabilidade interanual, embora nem sempre atingissem maiores rendimentos absolutos. Essa maior estabilidade decorre da compensação entre genótipos dominantes e subordinados, equilibrando as perdas e ganhos dentro da população.

Nos últimos anos, avanços no entendimento sobre diversidade funcional têm ampliado o potencial de misturas. De acordo com Assefa et al. (2019), cultivares modernas de soja demonstram alta plasticidade fenotípica, permitindo respostas mais eficientes a condições adversas como seca moderada ou baixa fertilidade do solo. Ensaio conduzidos por Wilson et al. (2022) sugerem que misturas podem aumentar o rendimento, especialmente em anos de maior estresse hídrico, reforçando a hipótese de que a complementariedade melhora a resiliência.

A seleção de combinações superiores, no entanto, continua sendo um desafio. A identificação de traços genéticos e fisiológicos que favorecem a coexistência e o melhor desempenho em mistura ainda é limitada, exigindo estudos mais profundos sobre arquitetura do dossel, interação radicular e dinâmica temporal de crescimento. De acordo com Rincker et al. (2014), genótipos com maior capacidade competitiva tendem a dominar misturas e, quando sua produtividade supera a soma das perdas

dos genótipos subordinados, podem ser considerados superiores. Assim, métodos de seleção que incorporem análises ecofisiológicas e predições genômicas tornam-se fundamentais para acelerar o desenvolvimento de misturas eficientes para a cultura da soja.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Delineamento e modelo

A metodologia proposta neste trabalho remete a uma adaptação do delineamento proposto por Perecin et al. (1997) para a metodologia de dialelos parciais com F1's e parentais, conforme Geraldi e Miranda Filho (1988). Posteriormente, a partir das médias das combinações de cultivares, é predito a produção de compostos multigenotípicos, com diferentes números e proporções de cultivares envolvidos.

O delineamento de competição proposto por Perecin et al. (1997) consiste em intercalar plantios de um determinado genótipo com os demais (Tabela 1), como segue:

I. Cada repetição deve haver tantas parcelas (P) quanto ao número de genótipos (G) $P = G$, a analisar;

II. Cada parcela deve conter o número de linhas conforme a expressão:

$$NL = [(G \times 2) - 1] + 4, \text{ sendo:}$$

Tabela 1 - Esquema experimental para testes de competição entre genótipos de plantas, sem casualização e repetição.

Nº da linha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Parcela A	A	A	A	A	A	B	A	C	A	D	A
Parcela B	B	B	B	B	B	C	B	D	B	A	B
Parcela C	C	C	C	C	C	D	C	A	C	B	C
Parcela D	D	D	D	D	D	A	D	B	D	C	D

Fonte: Perecin et al. (1997).

a) 4 linhas do *i-ésimo* genótipo seguidas, as linhas 1, 2, 3 e 4 caracterizando a autocompetição;

b) $(G \times 2) - 1$ linhas intercaladas do *i-ésimo* genótipo com os *j-ésimos* genótipos caracterizando a alocompetição; e

c) A primeira e última linha devem ser consideradas como bordaduras e a disposição dos genótipos e ordem das linhas devem obedecer a sorteio.

Os genótipos estão sempre ladeados pelo mesmo vizinho dentro da parcela: linhas 5, 7, 9 e 11 (Tabela 1), havendo alocompetição entre os demais genótipos e o *i-ésimo* genótipo. Nas linhas 2, 3 e 4, o *i-ésimo* genótipo está ao lado dele próprio, caracterizando a autocompetição. Assim, o delineamento permite todos os compostos de cultivares e a produção em autocompetição em linhas distintas. Para análise de variância deve considerar como parcelas subdivididas, em que o efeito do *i-ésimo* genótipo seja a parcela, ou seja, o efeito de exercer a competição e as linhas mensuradas o efeito dos *j-ésimos* genótipos sofrerem a competição.

A partir do delineamento de Perecin et al. (1997), propôs-se adotar o modelo de dialelos parciais com parentais conforme Geraldi e Miranda Filho (1988). Logo, apesar de serem os mesmos cultivares e estes possuíram duas capacidades gerais de competição, ou seja, capacidade geral de exercer a competição e capacidade geral de tolerar a competição, cada cultivar terá ainda dois valores como competidor: aquela que produz “*per se*” e o efeito da autocompetição sobre ele próprio e capacidade de produzir sofrendo competição dos demais em alocompetição. Da mesma forma, cada par de cultivares terá duas capacidades específicas de competição, ou seja, aquela que o cultivar “A” produz sofrendo o efeito competitivo de “B” e o inverso.

O modelo de Geraldi e Mirando Filho (1988) é definido por:

$$Y_{ij} = \mu + \frac{1}{2}(d_1 + d_2) + g_i + g_j + s_{ij} + \bar{\varepsilon}_{ij};$$

em que:

Y_{ij} : é a média *i-ésimo* clone sofrendo a competição do *j-ésimo* clone;

μ : é a média geral do experimento competitivo;

d_1 e d_2 : contrastes envolvendo médias dos grupos 1 e 2 e a média geral;

g_i : efeito da capacidade geral de tolerar a competição;

g_j : efeito da capacidade geral de exercer a competição;

s_{ij} : efeito da capacidade específica de competição; e

$\bar{\varepsilon}_{ij}$: erro experimental médio.

A partir das capacidades gerais e específicas estimadas serão calculadas as produções dos mixes de cultivares para compostos de 50% de cada cultivar e 67% do cultivar principal e 33% do secundário posteriormente selecionando os melhores que superarão a média dos cultivares formadores em auto competição, seguindo a metodologia “MÉTODO PARA PREDIÇÃO E SELEÇÃO DE COMPOSTOS MULTIGENOTÍPICOS PARA CULTURAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS®”, número de patente: BR102024020180-9.

3.2. Aplicação Prática

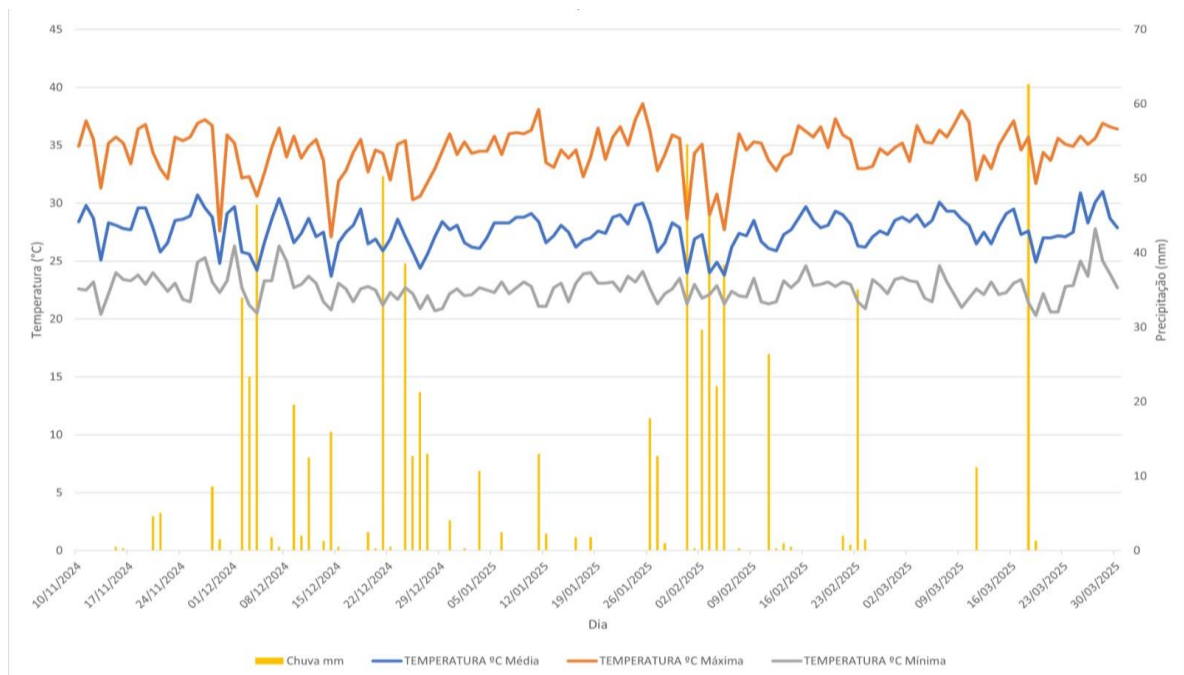
Foi conduzido ensaio em área experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp, no município de Selvíria-MS, localizada entre as coordenadas geográficas 51° 22' W e 20° 22' S, altitude de 335 m. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região em estudo é classificado como tropical de inverno seco e quente Aw, com chuva anual média de 1261 mm e temperatura do ar entre 21,4 e 26,9 °C e umidade relativa média de 62,4% (PORTUGAL et al. 2015). O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférico de textura argilosa, segundo classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2013). Na área experimental foi previamente feita a análise de solo, sendo realizada a correção e adubação do solo de acordo com as recomendações agronômicas para a cultura da soja. Durante o desenvolvimento da cultura foram realizados os controles de plantas daninhas, pragas e doenças de acordo com a necessidade.

Foram utilizados 18 materiais provenientes de diferentes empresas, classificados de acordo com seus respectivos Grupos de Maturidade Relativa (GMR), os quais variaram de 6,1 a 7,7. Esses materiais foram organizados em ordem crescente de GMR para facilitar a identificação e definição dos tratamentos.

Foi adotado delineamento experimental de blocos casualizados com três repetições em esquema de parcelas subdivididas sendo o competidor como parcela e cultivar como sub-parcela, de forma que há interação de todos os competidores com todos cultivares além das formas de autocompetição e alocompetição. A disposição dos cultivares foi realizada conforme a disposição delineada por Perecin et. al. (1997).

O plantio teve uma densidade de semeadura de 15 à 18 sementes metro linear, resultando numa população de 12 a 15 plantas por metro linear com espaçamento entre linhas de 0,50 m e quatro metros de comprimento por subparcela, sendo que a parcela é constituída de 17 linhas de cultivares intercaladas de linhas do competidor mais cinco linhas de autocompetição totalizando 39 linhas de plantio. O bloco foi constituído de 18 parcelas experimentais totalizando uma área experimental de aproximadamente de 0,5 ha. O Plantio do experimento foi efetuado no dia 15/11/2024 e a maturação dos materiais foi em torno de fim fevereiro e início de março, os dados de variações climáticas da época do experimento estão pormenorizados na Figura 1.

Figura 1. Variação diária da precipitação, temperatura mínima, média e máxima do ar, durante o cultivo de soja safra 2024/25 Selvíria-MS



Foi avaliada a produtividade em ton. ha⁻¹ corrigido a 13% de umidade e dias para maturação em R8. Para tanto, foram considerados os três metros centrais de cada subparcela. De posse dos dados foram analisados em esquema de parcelas subdividas, sendo o vizinho competidor como parcela e genótipos que estão sofrendo a competição como sub parcela, posteriormente foram obtidas as médias de produção das linhagens duas a duas que permitiu estimar a produção de compostos multigenotípicos com diferentes proporções.

As análises foram efetuadas inicialmente no programa SAS e, posteriormente, analisadas em dialelos pelo programa Genes (Cruz, 2003). Em seguida, foi estimado os valores para *mixes* genotípicos e posterior seleção dos *mix* superiores que superarem a média dos cultivares envolvidos. Foram calculados dois compostos multigenotípicos C50 que é formado por dois genótipos de soja com proporções iguais de meia a meia, também C67 em que o genótipo principal possui 67% das plantas e secundário 33% das plantas no plantio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dialélica revelou efeitos altamente significativos para os componentes de produtividade, demonstrando que a competição intergenotípica influenciou fortemente o desempenho das linhagens avaliadas (Tabelas 2 e 3). A ampla variabilidade observada entre genótipos quanto à capacidade de exercer e tolerar competição confirma a existência de diferenças genéticas nos mecanismos de supressão e resposta competitiva, conforme já discutido por Donald (1963) em sua definição de ideótipo agrícola, e posteriormente detalhado por Weiner (2004) ao caracterizar a habilidade competitiva como um traço evolutivamente custoso para sistemas agrícolas otimizados.

Tabela 2. Análise dialélica parcial F1's e parentais de Geraldi e Miranda Filho (1988), aferindo a capacidade geral de exercer (CGC I) e tolerar (CGC II) a competição e capacidade específica de competição, para produtividade de grãos (PROD ton ha⁻¹), em um teste competitivo de soja, na safra 2024/25, em Selvíria-MS.

FV	GL	Quadrado Médio	
		PROD (ton ha ⁻¹)	Maturação dias
Tratamentos	359	3,717**	13,94*
Grupo	1	3,473**	0,639 ^{ns}
CGC I	17	7,951**	70,89**
CGC II	17	15,80**	10,06 ^{ns}
CEC	324	2,862**	11,20 ^{ns}
Erro	682	0,276	11,65 ^{ns}
Média		2,932	99,27
<i>d1</i>		0,179	0,077
<i>d2</i>		-0,179	-0,077
Desvio Padrão		0,051	0,328

^{ns}, *, ** não significativo, significativo a 5% e 1% de probabilidade pelo teste F respectivamente.

Os resultados obtidos — com alocompetição (d_1) positiva e autocompetição (d_2) negativa — apontaram incrementos médios próximos de 10% na produtividade sob convivência intergenotípica. Esta magnitude supera a média global relatada por Kiær et al. (2009), cuja meta-análise sobre misturas de cultivares encontrou ganhos médios de 3,2% a 6,1% em espécies autógamas e alógamas. No entanto, valores similares aos encontrados neste estudo (10–13%) já foram observados em trabalhos de Finckh et al. (2000), Newton et al. (2009) e Zimmermann et al. (2015), que relatam aumentos substanciais quando as misturas apresentam complementaridade morfofisiológica marcante. Assim, os ganhos encontrados aqui situam-se no limite superior do espectro relatado na literatura, sugerindo forte sinergismo entre os genótipos utilizados.

Tabela 3. Capacidades Gerais de Exercer e Tolerar a competição e soma de ambas para experimento de soja para produção de grãos em ton ha⁻¹, em Selvíria-MS.

Genótipos	Exercer	Tolerar	Soma
1	0,202	0,359	0,560
2	-0,118	0,467	0,349
3	-0,320	-0,422	-0,742
4	0,443	-0,159	0,284
5	-0,391	0,867	0,476
6	0,435	0,182	0,617
7	-0,206	-0,170	-0,376
8	-0,152	-0,235	-0,387
9	0,047	0,701	0,748
10	-0,091	0,060	-0,032
11	0,467	-1,195	-0,728
12	0,168	-0,531	-0,363
13	0,068	-0,064	0,005
14	0,750	0,031	0,781
15	-0,297	0,382	0,085
16	-0,222	-0,223	-0,444
17	-0,296	0,325	0,029
18	-0,489	-0,375	-0,863
Desv. Pad.		0,063	

A análise dos compostos simulados C50 e C67 confirmou esses resultados, mostrando que a interação entre linhagens contrastantes resultou em maior eficiência de uso dos recursos ambientais (Tabelas 4, 5 e 6). Esses achados são consistentes

com os modelos de competição planta-a-planta descritos por Harper (1977) e com estudos experimentais em soja de Spehar e Landers (2010), que demonstraram que diferenças arquiteturais e fisiológicas entre linhagens podem reduzir a sobreposição de nicho dentro do dossel, favorecendo o particionamento complementar de luz e nutrientes. Também corroboram resultados de Falconer e Mackay (1996), que destacam que interações entre genótipos com efeitos não aditivos podem gerar desempenho superior ao esperado pela média simples dos componentes.

Tabela 4. Classificação (Class.) dos cultivares de soja em auto competição (Auto) e das 18 melhores mixes genotípicos do composto C50 (C50) e composto C67 (C67) para produtividade de grãos por hectare (ton.ha⁻¹) em um teste competitivo em Selvíria-MS.

Class.	Auto	Prod.	C50	Prod.	C67	Prod.
1	(4)	4,247	1x6	4,339	1X6	4,344
2	(1)	3,927	1x4	4,253	1X4	4,236
3	(6)	3,804	4x9	3,981	6X1	4,208
4	(14)	3,761	4x14	3,975	4X1	4,195
5	(2)	3,664	5x9	3,948	4X14	4,051
6	(9)	3,349	14x15	3,917	9X5	4,015
7	(17)	3,284	5x15	3,873	4X9	3,973
8	(13)	3,218	1x9	3,846	9X4	3,956
9	(8)	3,003	1x13	3,816	1X13	3,904
10	(7)	2,814	14x17	3,815	15X14	3,893
11	(5)	2,810	9x14	3,785	1X9	3,880
12	(16)	2,808	9x13	3,721	9X14	3,871
13	(15)	2,770	7x9	3,706	15X5	3,852
14	(12)	2,690	6x9	3,706	9X7	3,838
15	(11)	2,355	1x14	3,672	17X14	3,826
16	(18)	2,145	5x12	3,606	9X1	3,823
17	(10)	2,034	2x4	3,602	1X14	3,810
18	(3)	1,996	1x15	3,585	14X15	3,784

Além do ganho produtivo, observou-se redução da variabilidade no ciclo e na maturação entre os componentes da mistura, resultando em maior uniformidade de colheita. Estudo de Reiss e Drinkwater (2018) mostrou que sistemas multigenotípicos tendem a amortecer variações fenológicas, devido à estabilização proporcionada pela diversidade funcional, efeito também reportado em misturas de trigo por Newton et al.

(2011). Os resultados obtidos aqui são coerentes com essa interpretação, reforçando a utilidade agrônômica das misturas não apenas pelo aumento de rendimento, mas também pela facilitação do manejo e colheita.

Tabela 5. Médias entre pares de cultivares de soja em auto competição (diagonal acima), das suas respectivas médias em auto competição (diagonal em negrito) e dos compostos de 50% de cada cultivar (diagonal abaixo) de produtividade de grãos (ton,ha⁻¹) de pares de genótipos de soja em um teste competitivo, em Selvíria-MS, 2024/25,

Gen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Méd
1	3,93	3,80	2,96	4,09	3,37	3,87	3,37	3,46	3,64	2,98	3,14	3,31	3,57	3,84	3,35	3,37	3,61	3,04	3,46
2	3,09	3,66	2,83	3,96	3,24	3,73	3,24	3,33	3,51	2,85	3,01	3,18	3,44	3,71	3,22	3,24	3,47	2,90	3,33
3	3,09	2,73	2,00	3,12	2,40	2,90	2,40	2,50	2,67	2,01	2,18	2,34	2,61	2,88	2,38	2,40	2,64	2,07	2,55
4	4,25	3,60	2,68	4,25	3,53	4,03	3,53	3,62	3,80	3,14	3,30	3,47	3,73	4,00	3,51	3,53	3,77	3,20	3,61
5	3,15	3,24	<u>3,02</u>	2,55	2,81	3,31	2,81	2,91	3,08	2,42	2,58	2,75	3,01	3,29	2,79	2,81	3,05	2,48	2,93
6	<u>4,34</u>	3,33	2,98	3,51	3,47	3,80	3,31	3,40	3,58	2,92	3,08	3,25	3,51	3,78	3,29	3,31	3,54	2,97	3,40
7	2,66	2,99	2,01	2,97	2,99	3,27	2,81	2,91	3,08	2,42	2,58	2,75	3,02	3,29	2,79	2,81	3,05	2,48	2,93
8	3,12	3,17	2,81	3,01	3,13	3,01	2,54	3,00	3,18	2,52	2,68	2,85	3,11	3,38	2,89	2,91	3,14	2,57	3,02
9	3,85	3,36	<u>2,99</u>	3,98	<u>3,95</u>	3,71	<u>3,71</u>	2,89	3,35	2,69	2,85	3,02	3,28	3,55	3,06	3,08	3,32	2,75	3,18
10	2,73	3,08	2,49	3,47	2,53	3,47	<u>2,97</u>	2,65	3,22	2,03	2,19	2,36	2,63	2,90	2,40	2,42	2,66	2,09	2,57
11	2,82	3,05	2,35	2,55	<u>3,05</u>	3,19	2,60	2,36	1,89	<u>2,82</u>	2,36	2,52	2,79	3,06	2,56	2,58	2,82	2,25	2,72
12	2,88	3,44	2,28	3,02	<u>3,61</u>	2,82	2,76	2,89	3,17	2,54	<u>3,08</u>	2,69	2,95	3,23	2,73	2,75	2,99	2,42	2,87
13	3,82	3,19	<u>3,41</u>	2,95	<u>3,29</u>	2,78	2,77	3,03	<u>3,72</u>	2,66	1,85	2,51	3,21	3,49	2,99	3,01	3,25	2,68	3,12
14	3,67	3,53	2,57	3,97	3,24	3,32	3,34	2,65	3,78	3,15	2,48	2,43	3,43	3,76	3,27	3,28	3,52	2,95	3,38
15	3,59	3,18	2,20	3,35	<u>3,87</u>	3,30	2,96	2,82	3,19	<u>2,85</u>	2,47	2,78	3,21	<u>3,92</u>	2,77	2,79	3,03	2,46	2,91
16	3,37	2,60	2,46	2,74	2,38	2,93	2,68	2,73	2,89	2,58	2,57	<u>3,08</u>	2,92	3,36	2,74	2,81	3,05	2,48	2,93
17	3,32	3,43	2,81	3,22	<u>3,55</u>	3,56	2,72	3,20	3,32	2,38	2,72	2,50	3,32	<u>3,81</u>	3,15	2,55	3,28	2,71	3,15
18	2,49	2,75	<u>2,54</u>	2,53	2,67	2,78	2,24	2,31	<u>3,48</u>	<u>2,59</u>	2,29	2,52	2,81	2,72	2,78	2,45	2,58	2,14	2,62
Méd	3,31	3,16	2,67	3,20	3,16	3,28	2,83	2,84	3,36	2,83	2,60	2,84	3,04	3,26	3,08	2,77	3,07	2,62	

Valores na diagonal inferior em itálico superam a média em autocompetição dos cultivares envolvidos; valores sublinhados supera o melhor cultivar em autocompetição envolvido.

Tabela 6. Estimativas de produtividade de grãos (ton,ha⁻¹) de mixes de soja clonais, no composto com um cultivar como principal (colunas) com 67% e um cultivar como secundário (linhas) com 33% do plantio, respectivamente, em um teste competitivo em Selvíria-MS,

Gen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Méd
1		3,07	2,83	4,20	3,04	4,21	2,52	2,96	3,82	2,44	2,54	2,72	3,70	3,50	3,50	3,12	3,28	2,28	3,16
2	3,24		2,56	3,67	3,18	3,37	2,88	3,07	3,45	2,81	2,80	3,29	3,19	3,43	3,19	2,49	3,44	2,57	3,09
3	3,37	2,93		2,97	3,10	3,17	2,13	2,87	3,24	2,41	2,29	2,37	3,51	2,70	2,45	2,49	3,01	2,51	2,74
4	4,24	3,54	2,48		2,51	3,48	2,82	2,87	3,96	3,12	2,31	2,87	2,93	3,78	3,30	2,57	3,20	2,33	3,11
5	3,34	3,31	2,87	2,78		3,54	2,92	3,07	4,01	2,37	2,84	3,47	3,33	3,22	3,85	2,34	3,59	2,54	3,11
6	4,34	3,33	2,77	3,58	3,37		3,12	2,91	3,74	3,15	2,91	2,72	2,82	3,23	3,29	2,77	3,54	2,59	3,21
7	2,94	3,12	2,01	3,20	3,04	3,40		2,59	3,84	2,80	2,48	2,76	2,91	3,35	3,08	2,64	2,89	2,20	2,82
8	3,34	3,28	2,71	3,22	3,15	3,16	2,55		3,10	2,50	2,26	2,86	3,12	2,72	2,94	2,67	3,31	2,25	2,83
9	3,88	3,34	2,76	3,97	3,77	3,66	3,47	2,77		2,90	1,73	3,01	3,63	3,62	3,16	2,71	3,31	3,18	3,32
10	3,08	3,27	2,51	3,71	2,70	3,65	3,01	2,75	3,48		2,75	2,63	2,88	3,24	3,05	2,63	2,66	2,59	2,76
11	3,16	3,25	2,38	2,89	3,16	3,40	2,67	2,49	2,29	2,73		3,11	2,15	2,65	2,71	2,61	2,96	2,31	2,55
12	3,14	3,52	2,25	3,24	3,58	3,00	2,76	2,89	3,36	2,41	2,91		2,67	2,53	2,92	2,99	2,69	2,45	2,83
13	3,90	3,23	3,18	3,10	3,23	2,90	2,70	2,95	3,78	2,45	1,74	2,47		3,35	3,23	2,78	3,35	2,64	3,07
14	3,81	3,56	2,47	4,05	3,22	3,41	3,24	2,65	3,87	2,92	2,34	2,43	3,45		3,89	3,21	3,83	2,60	3,23
15	3,70	3,22	2,11	3,46	3,75	3,35	2,86	2,76	3,30	2,62	2,29	2,71	3,22	3,78		2,62	3,20	2,61	3,12
16	3,60	2,80	2,44	3,01	2,52	3,12	2,71	2,77	3,14	2,48	2,47	3,07	3,06	3,39	2,90		2,76	2,41	2,69
17	3,45	3,43	2,64	3,33	3,45	3,57	2,63	3,09	3,41	2,19	2,50	2,44	3,31	3,68	3,17	2,44		2,42	3,14
18	2,84	2,96	2,53	2,85	2,79	3,01	2,34	2,42	3,68	2,51	2,25	2,59	2,98	2,84	2,96	2,48	2,81		2,50
Med	3,49	3,25	2,61	3,33	3,18	3,35	2,86	2,88	3,41	2,85	2,64	2,87	3,04	3,24	3,07	2,85	3,03	2,76	

A aplicação de modelos de predição mostrou-se eficiente para identificar combinações com desempenho superior, reduzindo o número de tratamentos experimentais necessários. Esse achado se alinha aos avanços recentes em predição genômica e otimização de misturas, como demonstrado por Benin et al. (2021) e Sampoux et al. (2020), que defendem o uso de modelagem estatística e seleção assistida por informações de competição para acelerar a identificação de combinações geneticamente complementares.

Portanto, os resultados deste estudo confirmam, em concordância com a literatura internacional, que compostos multigenotípicos representam uma estratégia

promissora para aumentar produtividade, estabilidade e resiliência na cultura da soja. A integração entre modelagem genética, análise de competição e predição de misturas, como demonstrado aqui, reforça a perspectiva apresentada por Finckh e Wolfe (2021) de que sistemas multicultivares constituem uma das vias mais avançadas para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais eficientes, sustentáveis e adaptados à agricultura moderna.

5. CONCLUSÃO

- A competição entre genótipos influencia fortemente o desempenho produtivo da soja e há ampla variabilidade entre linhagens quanto à capacidade de competir e tolerar competição, permitindo a seleção de genótipos compatíveis para misturas eficientes.
- A alocompetição nos compostos simulados (C50 e C67) gerou ganhos de 10–13% em produtividade, sendo que genótipos respondem de forma diferenciada a competição, contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis e produtivos.
- Os modelos de predição ajudam a selecionar combinações superiores e reduzir tratamentos experimentais, sendo que os melhores mixes foram para C50 1x6 e 5x9 com produtividades de 4,339 e 3,948 ton ha⁻¹ e para C67 foram os mixes 1x6 e 9x5 com produtividades de 4,334 e 4,015 ton ha⁻¹ superando o melhor genótipo envolvido quando em auto competição, porém recomenda-se a seleção de pelo menos 10 mixes para testes complementares de avaliação de produtividade, adaptabilidade e estabilidade fenotípica a fim de lançar uma cultivar de misturas genotípica.

REFERÊNCIAS

- ASSEFA, Y. et al. Soybean yield response to plant density by yield environment in North America. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 1, p. 192–204, 2019.
- BENIN, G. et al. Prediction models and multi-trait selection applied to cultivar mixtures. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 134, n. 5, p. 1503–1518, 2021.
- BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1-2, p. 5–16, 2004.
- BOARD, J. Kahlon, C. S. Soybean yield formation: what controls it and how can it be improved? In: BOARD, J. (ed.). **A comprehensive survey of international soybean research**. Rijeka: InTech, 2012. p. 1–36.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de Plantas**. 7. ed. Viçosa: UFV, 2017.
- BOYDEN, S.; BINKLEY, D.; STAPE, J. L. Competition among *Eucalyptus* trees depends on genetic variation and resource supply. **Ecology**, Columbus, v. 89, n. 10, p. 2850–2859, 2008.
- BRUZI, A. T. et al. Homeostasis in bean population with different genetic structures. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Londrina, v. 7, n. 2, p. 111–116, 2007.
- CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB do agronegócio brasileiro**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2025. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 2 out. 2025.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira: grãos, safra 2024/2025 – 5º levantamento**. Brasília: CONAB, 2025.
- CROPLIFE BRASIL. **Soja transgênica: impacto econômico e expansão no Brasil**. São Paulo: CropLife, 2024.
- DONALD, C. M. Competition among crop and pasture plants. **Advances in Agronomy**, New York, v. 15, p. 1–118, 1963.
- DONALD, C. M. The breeding of crop ideotypes. **Euphytica**, v. 12, p. 385–393, 1963.
- EFEEDLINK. Brazil's area planted to soybeans set to hit nearly 50 million hectares, according to USDA-FAS. 2025. Disponível em: <https://www.efeedlink.com/contents/07-07-2025/72ecea9-7214-429a-a679-2c34f76c7720-0001.html>. Acesso em: 18 out. 2025.
- EMBRAPA. **Melhoramento genético de Soja: prioridades e perspectivas para os próximos 10 anos**. Londrina: Embrapa Soja, 2024.

- EMBRAPA. **Pragas e doenças da cultura da Soja**: diagnóstico e manejo atual. Londrina: Embrapa Soja, 2023.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013.
- FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. **Introduction to Quantitative Genetics**. 4. ed. London: Longman, 1996.
- FAO. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2024**. Roma: FAO, 2024. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd2971en>. Acesso em: 18 out. 2025.
- FINCKH, M. R.; GACEK, E.; GOYEAU, H.; et al. **Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance**. *Agronomie*, v. 20, n. 7, p. 813–837, 2000.
- FINCKH, M. R.; GELLER, G.; BRUNS, C.; KÜHNE, S. Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie*, v. 20, p. 813–837, 2000.
- FINCKH, M. R.; WOLFE, M. S. Diversification strategies in agricultural systems. *Plant Pathology*, v. 70, p. 53–67, 2021.
- GALVÃO, J. C. C.; MIRANDA, G. V. **Tecnologia de produção de sementes**. Viçosa: UFV, 2014.
- GERALDI, I. O.; MIRANDA FILHO, J. B. Adapted models for the analysis of combining ability of varieties in partial diallel crosses. *Brazilian Journal of Genetics*, Ribeirão Preto, v. 11, p. 419–430, 1988.
- HARPER, J. L. **Population biology of plants**. London: Academic Press, 1977.
- HELLAND, S. J.; HOLLAND, J. B. Blend response, stability and cultivar blending ability in oat. *Crop Science*, Madison, v. 41, n. 6, p. 1689–1696, 2001.
- HYMOWITZ, T. On the domestication of the soybean. *Economic Botany*, v. 58, n. 3, p. 326–336, 2004.
- KIÆR, L. P.; SKOVGAARD, I. M.; ØSTERGAARD, H. Meta-analysis of crop cultivar diversity and disease resistance. *Plant Pathology*, v. 58, p. 1–16, 2009.
- MARTINS, G. S. et al. Performance of *Eucalyptus* clones in auto and allocompetition. *Silvae Genetica*, Frankfurt, v. 63, n. 1-2, p. 9–15, 2014.
- MCNAUGHTON, S. J.; WOLF, L. L. **General ecology**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1973.

- MOURA, G. P. L. **Estimação de parâmetros de competição entre clones de eucalipto**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- MUDRAK, E. et al. Genotypic mixtures increase stability of soybean yields across environments. **Field Crops Research**, v. 264, p. 108045, 2021.
- MULATO, B. M. **Diversidade genética em germoplasma de soja identificada por marcadores SSR, EST-SSR e caracteres agromorfológicos**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- NEWTON, A. C. et al. Deployment of diversity for enhanced crop function. **Annals of Applied Biology**, v. 154, p. 309–322, 2009.
- NEWTON, A. C.; BEZANT, J. et al. Increased yield stability in inter-cultivar barley mixtures. **Field Crops Research**, v. 124, p. 366–373, 2011.
- OLIVEIRA, S. H. F. Resistência genética e manejo integrado de doenças da soja. **Revista Brasileira de Fitopatologia**, v. 43, p. 138–150, 2018.
- PAVAN, B. E. et al. Competitive ability among *Eucalyptus* spp. commercial clones in Mato Grosso do Sul state. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 494, p. 1–7, 2021.
- PERECIN, D. et al. Um delineamento para avaliações de auto e alocompetição em plantas. **Revista de Matemática e Estatística**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 195–200, 1997.
- PORTUGAL, J. R. et al. Aspectos climáticos no feijoeiro. In: ARF, O. et al. (Ed.). **Aspectos gerais da cultura do feijão**. Botucatu: Fepaf, 2015. p. 65–75.
- REISS, E. R.; DRINKWATER, L. E. Cultivar mixtures and agroecosystem resilience. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 256, p. 14–22, 2018.
- RESENDE, R. T. et al. Environmental uniformity, site quality and tree competition interact to determine stand productivity of clonal *Eucalyptus*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 410, p. 76–83, 2018.
- RINCKER, K. et al. Genetic improvement of U.S. soybean in maturity groups II and III. **Crop Science**, v. 54, n. 4, p. 1419–1432, 2014.
- SAMPOUX, F. et al. Design of cultivar mixtures using predictive models. **Field Crops Research**, v. 249, p. 107–114, 2020.

- SILVA, A. D.; LIMA, E. D.; BATISTA, H. R. A importância da soja para o agronegócio brasileiro. In: ENCONTRO DE ECONOMIA CATARINENSE, 5., 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UNESC, 2011.
- SILVA, V. M. P. **Estimação de parâmetros de competição entre plantas do feijoeiro**. 2007. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.
- SPECHT, J. E.; HUME, D. J.; KUMUDINI, S. V. Soybean yield potential. **Crop Science**, v. 39, p. 1560–1570, 1999.
- SPEHAR, C. R.; LANDERS, J. Crop genetic diversity and soybean performance in mixed stands. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, p. 220–230, 2010.
- TEIXEIRA, E. I.; TRINDADE, M. Conservação e uso de recursos genéticos vegetais no melhoramento. **Agropecuária Científica**, v. 27, p. 45–58, 2021.
- TILMAN, D. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. **Science**, v. 277, p. 1300–1302, 1997.
- UNESP. **Dados Climáticos**. Canal CLIMA da UNESP, 2025. Disponível em: <https://clima.feis.unesp.br/>. Acesso em: 17 out. 2025.
- USDA. **Brazil: Oilseeds and Products Annual (GAIN Report)**. Brasília, 2025.
- USDA. **Soybeans – Production, Supply and Distribution (PS&D) Online**. Washington, DC, 2025.
- USDA. **World Agricultural Supply and Demand Estimates: October 2024**. Washington, D.C.: USDA, 2024.
- VOORA, V. et al. **Global market report: soybean prices and sustainability**. Winnipeg: IISD, 2024. Disponível em: <https://www.iisd.org/publications/report/2024-global-market-report-soybean>. Acesso em: 17 out. 2025.
- VOORA, V. et al. **Global market report: soybeans**. Winnipeg: IISD, 2020.
- WEINER, J. Allocation, plasticity and allometry in plants. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 6, p. 207–215, 2004.
- WILSON, E. W. et al. Yield and stability of soybean cultivar mixtures under water-limited conditions. **Agricultural Water Management**, v. 265, p. 107528, 2022.
- ZHANG, L. et al. Soybean root response to nitrogen supply under contrasting genotypes. **Plant and Soil**, v. 450, p. 389–404, 2020.
- ZIMMERMANN, M. J. O. et al. Genotypic complementarity and yield gains in crop mixtures. **Agronomy Journal**, v. 107, p. 207–215, 2015.