

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO – PR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – PPGA
MESTRADO

ATRIBUTOS RELACIONADOS À RESISTÊNCIA AO ACAMAMENTO EM
CULTIVARES ANTIGAS E MODERNAS DE SOJA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LEONARDO ZABOT ANDERLE

GUARAPUAVA-PR

2021

LEONARDO ZABOT ANDERLE

**ATRIBUTOS RELACIONADOS À RESISTÊNCIA AO ACAMAMENTO EM
CULTIVARES ANTIGAS E MODERNAS DE SOJA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Jackson Kawakami

Orientador

Dr. Renan Caldas Umburanas

Coorientador

GUARAPUAVA-PR

2021

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da Unicentro

A543a Anderle, Leonardo Zobot
Atributos relacionados à resistência ao acamamento em cultivares antigas e modernas de soja / Leonardo Zobot Anderle. -- Guarapuava, 2021. xii, 51 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Área de concentração: Produção Vegetal, 2021.

Orientador: Jackson Kawakami
Coorientador: Renan Caldas Umburanas
Banca Examinadora: Clovis Pierozan Júnior, Leandro Rampim

Bibliografia

1. Altura. 2. Biomassa. 3. Raiz. 4. *Glycine max*. 5. *Lignina*. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

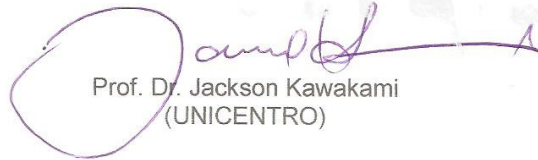
CDD 630

Leonardo Zobot Anderle

**ATRIBUTOS RELACIONADOS À RESISTÊNCIA AO ACAMAMENTO EM CULTIVARES
ANTIGAS E MODERNAS DE SOJA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 17 de dezembro de 2021.



Prof. Dr. Jackson Kawakami
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Leandro Rampim
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Clóvis Pierozan Júnior
(IFPR)

GUARAPUAVA-PR

Dedico aos meus pais, Gilmar Anderle e Valdemir Salette Zobot Anderle, por todo esforço e dedicação confiados a mim, que me permitiram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

A toda minha família, por todo apoio e momentos de confraternização vivenciados juntos.

Ao meu orientador, prof. Dr, Jackson Kawakami, por todos os ensinamentos repassados ao longo dos anos, pela dedicação em ajudar em meu desenvolvimento e pela compreensão.

Ao meu coorientador Dr. Renan Caldas Umburanas, pela amizade e por todo apoio prestado durante o desenvolvimento desse trabalho.

A todos que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho, em especial ao meu amigo e colega Anderson Hideo Yokoyama pela parceria na realização das atividades de campo.

Aos alunos da graduação que desenvolveram atividades de iniciação científica junto ao trabalho, Ramon Alan Lustosa Soares, Douglas Oliveira Barbosa e Jalisson Gabriel Stremel Cabral por todo apoio prestado.

A todos os professores e secretaria do PPGA Unicentro pelo apoio prestado durante esse período.

A Capes pela bolsa concedida para realização desse trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
3.1 Histórico da soja.....	4
3.1.1 Origem e distribuição geográfica	4
3.1.2 A soja no Brasil	4
3.2 Panorama 1961 – 2018.....	5
3.2.1 Panorama da área, produção e produtividade	5
3.2.2 Panorama do acamamento.....	6
3.3 Acamamento na soja.....	7
3.3.1 Tipos de acamamento.....	7
3.3.2 Estádios críticos	8
3.3.3 Influência do ambiente	8
3.3.3.1 <i>Temperatura</i>	8
3.3.3.2 <i>Radiação solar</i>	9
3.3.4 Influência do genótipo.....	9
3.3.4.1 <i>Comprimento de internódio</i>	9
3.3.4.2 <i>Composição bioquímica da haste</i>	10
3.3.4.3 <i>Resistência física da haste</i>	11
3.3.4.4 <i>Anatomia e estrutura da haste</i>	11
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4.1 Descrição do local.....	13
4.2 Delineamento experimental e instalação dos tratamentos	13
4.3 Avaliações	14
4.3.1 Avaliação destrutiva aos 70 dias após emergência	14
4.3.2 Avaliação de acamamento.....	16
4.3.3 Produtividade e seus componentes.....	16
4.4 Dados meteorológicos	17
4.5 Análise estatística	18
5 RESULTADOS	19
5.1 Produtividade.....	19
5.1.1 Tendência dos componentes produtivos ao longo do tempo	19
5.1.2 Análise de componentes principais para produtividade.....	21
5.2 Resistência ao acamamento.....	21

5.2.1 Atributos morfológicos da planta de soja aos 70 DAE	22
5.2.2 Atributos estruturais, nutricionais, e histológicos da haste	25
5.2.3 Análise componentes principais para acamamento.....	29
6 DISCUSSÃO	30
6.1 Produtividade	30
6.2 Resistência ao acamamento.....	31
7 CONCLUSÕES	35
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise química e física do solo na área que foi implantado o experimento. Guarapuava, Paraná, Brasil.	13
Tabela 2. Lista de cultivares com seu respectivo ano de lançamento, hábito e ciclo de crescimento.	14
Tabela 3 – Dados da análise de variância para área do xilema, área da medula e proporção do xilema entre cultivares de soja resistentes e suscetíveis ao acamamento.	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área (A), produção (B) e produtividade (C) da soja no Brasil e no mundo entre 1960 e 2018. Fonte: FAOSTAT, 2020.	5
Figura 2 - Dados meteorológicos para a safra 2020/2021 (de novembro até maio): precipitação, temperatura máxima, mínima e média diária em Guarapuava, PR, Brasil.....	17
Figura 3 - Produtividade (A), número de sementes por área (B), massa de mil sementes (PMS) (C), número de vagens por área (D), número de sementes por vagem (E), número de vagens vazias (F), índice de colheita (G) e estágio do início do acamamento (H) relacionados ao ano de lançamento de cultivares de soja na safra 2020/2021.....	20
Figura 4 – Análise de componentes principais para produtividade e seus atributos.....	21
Figura 5 – Nota de acamamento aos 70 dias após emergência e no ponto de colheita (A) e índice de resistência ao acamamento (B) relacionados ao ano de lançamento de cultivares de soja na safra 2020/2021.	22
Figura 6 – Altura da planta (A), número de nós por m ² (B), comprimento dos primeiros internódios (C), diâmetro dos primeiros internódios (D), índice de área foliar (IAF) (E), massa seca da raiz (F), massa seca das folhas (G) e massa seca da haste (H) aos 70 dias após emergência relacionados ao ano de lançamento de cultivares de soja na safra 2020/2021.....	24
Figura 7 – Resistência da haste ao rompimento (A) e teor de lignina (B), celulose (C), potássio (D), cálcio (E), cobre (F) e manganês (G) na haste de soja avaliados aos 70 dias após emergência relacionados a o ano de lançamento de cultivares de soja na safra 2020/2021.	26
Figura 8 – Corte transversal do 4º internódio da haste de cultivares de soja resistentes e suscetíveis ao acamamento. Cultivar NA5909 (A), BMX Apolo (B), IAS3 (C) e Viçoja (D). Área do xilema das cultivares (E).	28
Figura 9 – Análise componentes principais para índice de acamamento na soja.....	29

RESUMO

Leonardo Zobot Anderle. Atributos relacionados à resistência ao acamamento em cultivares antigas e modernas de soja

Constantemente se busca aumentar a produtividade da cultura da soja para suprir a crescente demanda mundial. Um atributo ligado ao aumento da produtividade é a resistência ao acamamento, que melhora o aproveitamento da radiação solar, reduz a incidência de doenças e diminui as perdas na colheita. O objetivo deste estudo foi caracterizar, em uma série histórica de cultivares de soja, os atributos que estão associados à resistência ao acamamento. O experimento foi realizado em Guarapuava-PR sob delineamento de blocos aleatorizados com três repetições. Em 26 cultivares de soja lançadas entre 1960 e 2018 foram avaliados atributos morfológicos, bioquímicos, histológicos e físicos da haste e da planta, além da produtividade e seus componentes. A produtividade e a resistência ao acamamento aumentaram ao longo do tempo nas cultivares de soja brasileiras. A maior produtividade ocorreu pelo aumento do número de sementes por área, variável que foi afetada negativamente pelo acamamento de plantas. O aumento da resistência ao acamamento ocorreu devido à alteração de atributos do dossel da planta, principalmente pela menor biomassa da parte aérea, maior biomassa da raiz, menor altura de planta e menor comprimento de internódios. Os teores de lignina, celulose, nutrientes e resistência física da haste não alteraram ao longo do tempo e não influenciaram de forma direta no aumento da resistência ao acamamento.

Palavras-Chave: altura, biomassa, raiz, *Glycine max*, lignina.

ABSTRACT

Leonardo Zobot Anderle. Attributes related to lodging resistance in old and modern soybean cultivars

There is a constant search for increasing soybean yield to meet world demand. An attribute linked to increased yield is resistance to lodging, which improves the use of solar radiation, reduces the incidence of disease and reduces losses at harvest. The objective of this study was to characterize, in a historical series of soybean cultivars, the attributes associated with resistance to lodging. The experiment was conducted in Guarapuava-PR under a randomized block design with three repetitions. In 26 soybean cultivars released between 1960 and 2018, morphological, biochemical, histological and physical stem and plant attributes, were evaluated in addition to yield and its components. Yield and resistance to lodging increased over time in Brazilian soybean cultivars. The higher yield occurred by increasing the number of grains per area, a variable that was negatively affected by lodging. The increase in resistance to lodging occurred due to altered plant canopy attributes, mainly by lower shoot biomass, higher root biomass, lower plant height and shorter internode length. The contents of lignin, cellulose, and the physical strength of the stem did not change over time and did not directly influence the increase in resistance to lodging.

Keywords: biomass, *Glycine max*, height, lignin, root.

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) é *commodity* de importância econômica e alimentar no Brasil e o no mundo. Na safra 2020/2021 foram produzidas cerca de 135,4 milhões de toneladas no Brasil, em área de aproximadamente 38,5 milhões de hectares (CONAB, 2021). Esse montante representa 37,3% da produção mundial, e confere ao Brasil o título de maior produtor e exportador mundial do grão (USDA, 2021).

No Brasil o cultivo da soja começou a se intensificar na década de 60 e se estabeleceu, principalmente na região Sul (MONTROYA et al., 2019). Durante esse período surgiram empresas de pesquisa e melhoramento genético de plantas que passaram a desenvolver cultivares cada vez mais adaptadas às diferentes latitudes e condições edafoclimáticas.

Desde a safra de 1960 até a safra 2020 a produtividade média da cultura no Brasil aumentou de 1127 kg ha⁻¹ para 3517 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021; FAOSTAT, 2020). O aumento está relacionado às melhorias no manejo e, principalmente, no incremento do potencial produtivo em paralelo ao lançamento de novas cultivares (WILSON et al., 2014). O ganho médio de produtividade das cultivares lançadas desde 1960 até 2016 no Brasil foi de 45,9 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (UMBURANAS, 2019).

Estudos mostram que a seleção de plantas com resistência ao acamamento está associada ao aumento da produtividade (KOESTER et al., 2014; TODESCHINI et al., 2019; UMBURANAS, 2019). Isso se deve, principalmente, ao fato de que quando a planta permanece ereta ocorre maior aproveitamento da radiação solar (KENDALL et al., 2017) e menor incidência de doenças (ANDRADE; FILHO; CUNHA, 2018) o que por consequência promove a qualidade e o volume de grãos produzidos.

O acamamento ocorre principalmente em regiões de maior altitude, em virtude da amplitude térmica, em que as noites costumam ter menores temperaturas, o que reduz a fotorrespiração e permite maior saldo fotossintético, resultando em maior crescimento da planta. Regiões com temperaturas amenas dentro do intervalo ótimo para a cultura da soja, com boa disponibilidade hídrica e solos com boa fertilidade, também favorecem o crescimento vegetativo da planta e por consequência a susceptibilidade ao acamamento. Além do fator ambiental, o acamamento também é controlado pelo genótipo, sendo que há no mercado materiais com diferentes níveis de tolerância.

Estudos que envolvem o acamamento da soja quando cultivada em consórcio com milho mostram que a resistência está diretamente ligada à morfologia, resistência física e composição

bioquímica da haste (HUSSAIN et al., 2019; WEN et al., 2020). Entretanto, não se sabe se o mesmo comportamento ocorre para condições de monocultura, forma predominante de cultivo de soja nos maiores países produtores. Realizar a fenotipagem dos atributos da planta conduzida em monocultura que propiciam a ocorrência de acamamento contribuirá para o melhoramento genético mitigar esse problema no desenvolvimento de futuras cultivares.

Diante do exposto, as seguintes hipóteses foram formuladas: (i) cultivares modernas são mais resistentes ao acamamento; (ii) a resistência ao acamamento em cultivares de soja contribuiu para o aumento da produtividade; (iii) a resistência ao acamamento ocorre em resposta a melhor composição e estrutura da haste das plantas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar os atributos associados à resistência ao acamamento em série histórica de cultivares de soja.

2.2 Objetivos específicos

- Testar se cultivares modernas de soja são mais resistentes ao acamamento;
- Investigar se a resistência ao acamamento em cultivares de soja contribuiu para o aumento da produtividade;
- Examinar se a estrutura morfológica e bioquímica da base da haste está relacionada ao acamamento em série histórica de cultivares de soja.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Histórico da soja

3.1.1 Origem e distribuição geográfica

Os primeiros registros do cultivo de soja datam de 2838 a.C., na China Antiga. Naquela época a espécie cultivada era a *Glycine soja*, planta de hábito de crescimento rasteiro. A soja era considerada planta sagrada pelos povos que habitavam a China antiga, pois junto com o arroz, trigo, cevada e milho constituía a base da alimentação local (BONATO; BONATO, 1987). A partir daí, a soja foi melhorada por meio de cruzamentos espontâneos e induzidos, dando origem à espécie cultivada atualmente, a *Glycine max* (L.) Merrill.

Foi somente no século II a.C que a soja começou a ser disseminada geograficamente, sendo levada de seu centro de origem para a região da Manchúria, Coréia e, posteriormente, para o Japão, no século III d.C. A partir do século XV foi levada para a Europa, onde passou a ser estudada por cientistas em jardins botânicos de diversos países, como Alemanha, França e Inglaterra (WILCOX, 1987).

A soja chegou nos Estados Unidos apenas no início século XIX, introduzida no Estado da Pensilvânia como promissora forrageira (SPECHT et al., 2015). Porém, somente no final do século XIX (1880), depois de diversos estudos e ensaios em vários locais que a soja passou a ser recomendada para o cultivo de grãos, fato que fez com que dois anos depois a soja chegasse ao Brasil (CAMARA, 2000).

3.1.2 A soja no Brasil

O primeiro registro da soja no Brasil data de 1882, trazida dos EUA pelo professor e cientista da Escola de Agronomia da Bahia, Gustavo Rodrigues Pereira D'Utra (BONATO; BONATO, 1987). Essa primeira introdução da cultura no país não obteve sucesso, pois as cultivares americanas não se adaptaram bem às condições do Estado da Bahia devido às diferenças ambientais, principalmente de fotoperíodo.

Em 1914 a soja foi cultivada pela primeira vez no Rio Grande do Sul, por intermédio do professor Craig, americano que estava lecionando cursos na Escola Superior de Agronomia e Veterinária. Ele trouxe cultivares americanas e distribuiu para centros de pesquisa em diversos

municípios desse estado, local que apresentava grande semelhança com as condições climáticas do sul dos Estados Unidos, o que possibilitou o bom desenvolvimento dessas cultivares.

A partir desse período a soja começou a ganhar espaço na agricultura brasileira, e o seu cultivo intensificou-se no Paraná na década de 50 pelo binômio trigo/soja. Os agricultores paranaenses haviam sofrido grandes perdas nas lavouras de café devido às geadas, e encontraram na soja uma cultura segura, com facilidade para mecanização e com demanda nacional e internacional (DUCLÓS, 2014).

A partir da década de 60 até os dias atuais o desenvolvimento da produção de soja foi dividido em três grandes fases. A fase 1, que ocorreu entre 1960 e 1980, foi marcada pela introdução de diversas cultivares dos Estados Unidos. Na fase 2, de 1981 aos anos 2000, ocorreu a expansão do cultivo da soja para regiões de menor latitude. Já a fase 3, de 2001 ao presente, está sendo marcada pelo início da utilização de cultivares transgênicas e pela intensificação da utilização de cultivares com hábito de crescimento indeterminado (SPECHT et al., 2015).

3.2 Panorama 1961 – 2018

3.2.1 Panorama da área, produção e produtividade

Em 1961 a área cultivada com soja no mundo era de 23,8 milhões de hectares, dos quais 240 mil hectares oriundos do Brasil, ou seja, correspondia a 1% da área mundial cultivada (Figura 1a).

A área brasileira destinada à cultura da soja aumentou com o tempo, e chegou a 38,5 milhões de hectares na safra 2020/2021, enquanto no mundo foram cultivados 127,8 milhões de hectares, ou seja, 30% de toda área de soja cultivada no mundo oriunda do Brasil (USDA, 2021).

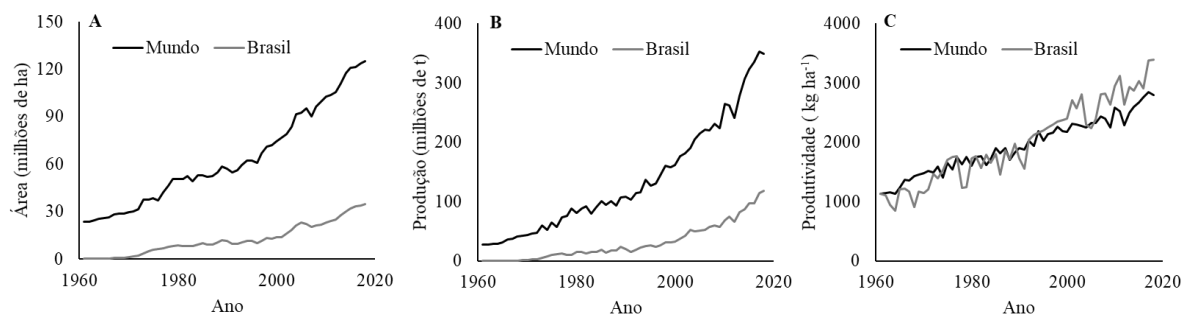


Figura 1 - Área (A), produção (B) e produtividade (C) da soja no Brasil e no mundo entre 1960 e 2018. Fonte: FAOSTAT, 2020.

A produção mundial em 1961 foi de 26,9 milhões de toneladas. O Brasil estava iniciando a fase 1 de expansão da soja, com introdução de diversas cultivares e baixo nível tecnológico para o cultivo, com produção estimada em 271 mil toneladas (Figura 1B). Já na safra 2020/21 a produção mundial atingiu a marca de 362,9 milhões de toneladas produzidas com o Brasil responsável por 135,4 milhões de toneladas, sendo o maior produtor de soja do mundo, seguido pelos EUA, que produziram 112,5 milhões de toneladas (USDA, 2021). A produtividade da soja no Brasil e no mundo tem aumentado ao longo dos anos (Figura 1C). Esse aumento da produtividade é atribuído às melhorias de manejo e, principalmente, ao aumento da produtividade potencial das cultivares (SUHRE et al., 2014).

No Brasil, estima-se que o ganho médio de produtividade das cultivares lançadas desde 1960 até 2016 para a região sul seja de 45,9 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (UMBURANAS, 2019). Outro estudo, com cultivares lançadas para região sul no período de 1965 a 2011 mostra que o ganho genético foi de aproximadamente 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹, ou seja, aumento de 2,4% a cada ano (TODESCHINI et al., 2019). No mundo o aumento da produtividade também está ligado principalmente aos ganhos genéticos (SUHRE et al., 2014). Na China, por exemplo, ocorreu ganho genético de produtividade de 6 a 16 kg ha⁻¹ ano⁻¹ dependendo da região de cultivo, de 1923 até 2007 (WU et al., 2015).

Dentre os aspectos agronômicos que elevaram a produtividade da soja, destaca-se o aumento do número de sementes por área (QIN et al., 2017; UMBURANAS, 2019). Uma das formas de aumentar o número de sementes por área é pelo aumento da densidade de semeadura (UMBURANAS et al., 2019). Porém, ao elevar a densidade de semeadura, aumenta as chances de ocorrer acamamento na cultura (COBER et al., 2005), sendo necessário utilizar cultivares com resistência ao acamamento para aumentar a produtividade por meio do aumento da densidade de semeadura (SPADER; DESCHAMPS, 2015).

3.2.2 Panorama do acamamento

Estudos mostram que o acamamento na soja tem diminuído com o lançamento de novas cultivares na China (JIN et al., 2010; WANG et al., 2016), Estados Unidos (KOESTER et al., 2014; ROGERS et al., 2015), Argentina (DE FELIPE; GERDE; ROTUNDO, 2016), Canadá (VOLDENG et al., 1997) e no Brasil (TODESCHINI et al., 2019; UMBURANAS, 2019).

Apesar dos efeitos do acamamento e sua relação com a produtividade serem amplamente reportados, os fatores que predisõem a planta a apresentar maior resistência ao

acamamento ainda foram pouco estudados. Entender o porquê das cultivares serem mais resistentes ao acamamento vai contribuir para o desenvolvimento de futuras cultivares com maior resistência ao acamamento, e indiretamente, contribuirá com maior produtividade potencial das futuras cultivares.

3.3 Acamamento na soja

3.3.1 Tipos de acamamento

Assim como em outras culturas, na soja o acamamento pode ocorrer por falha na ancoragem da raiz ou pela fragilidade da haste da planta, a qual não suporta o próprio peso e faz com que acame (BERRY et al., 2004). Em algumas cultivares a interação desses dois fatores podem determinar a resistência ao acamamento, como foi observado em estudo realizado com população de 165 linhagens endogâmicas recombinantes de soja obtidas pelo cruzamento entre cultivar resistente e suscetível, na qual 55% da variação no acamamento foi explicado pela altura das plantas e pelo peso das raízes (CHEN et al., 2017). Além do peso da raiz, estudos mostram que quanto maior o número de raízes primárias, maior é a resistência da planta ao acamamento, pois ela consegue se fixar melhor no solo e, assim, resiste a eventos externos como fortes ventos e chuvas torrenciais (KITABATAKE et al., 2019).

Foi reportado que um fator de predisposição à ocorrência de acamamento é a relação entre comprimento e o diâmetro de haste principal, e que quanto mais alta a planta e fina for a haste, maior é a probabilidade de a planta acamar (HARBACH et al., 2016; LIU et al., 2015). Assim, todos os fatores que afetam a altura da planta podem afetar a resistência ao acamamento. Um exemplo é o hábito de crescimento, em que as cultivares determinadas tendem a ser mais resistentes ao acamamento do que as indeterminadas devido a menor altura da haste (KATO et al., 2019).

Além da altura e diâmetro, outros fatores ligados a haste estão sendo estudados e influenciam no acamamento, como resistência física da haste (CHEN et al., 2011), relação do xilema e do parênquima medular (LIU et al., 2019a), teor de lignina e celulose (HUSSAIN et al., 2019) e teor de auxina (JIANG et al., 2020).

Todas essas características são influenciadas pelo ambiente, e pela interação entre genótipo e ambiente. Logo, entender qual a participação de cada uma delas na resistência da soja ao acamamento pode auxiliar no desenvolvimento de cultivares mais resistentes.

3.3.2 Estádios críticos

O acamamento pode ocorrer em qualquer período do desenvolvimento da cultura. Para países que cultivam soja consorciada com milho, o estágio crítico é logo após a emergência. Já para locais em que o cultivo é feito de forma convencional (monocultura), o estágio crítico é entre o final do período vegetativo até a colheita.

Na China, por exemplo, a semeadura de soja e milho consorciado é prática comum. Porém, o sombreamento que a planta de milho causa sobre a soja faz com que ela acame logo após a emergência, devido ao alongamento excessivo do hipocótilo e dos internódios. Dessa forma, a soja acaba não atingindo alto potencial produtivo e dificulta a mecanização da semeadura consorciada (LI et al., 2020; LIU et al., 2015).

No Brasil, em que a soja é cultivada de forma majoritária em monocultura, não há problema com sombreamento após a emergência. Com isso, o período crítico para ocorrer o acamamento é a partir do momento em que a cultura chega próximo ao seu máximo crescimento vegetativo. Em monocultura de soja o estágio mais crítico para ocorrência de acamamento é o de enchimento de grãos (R₅) (FEHR; CAVINESS, 1977), no qual podem ocorrer perdas de até 32% de produtividade (WOODS; SWEARINGIN, 1977).

Em estudo que forçou o acamamento na soja no início de florescimento (R₁), no início de formação de vagens (R₃) e no início do enchimento de grãos (R₅) concluiu-se que o acamamento no estágio R₃ foi o mais prejudicial e reduziu a produtividade em 17% (SHAPIRO; FLOWERDAY, 1987). Outro estudo reportou que o acamamento de plantas depois de R₃ reduziu a produtividade final em até 34%. Além disso, constatou-se que o acamamento em R₁ causou perdas de produtividade de 9% (SAITOH; NISHIMURA; KITAHARA, 2012).

Quando o acamamento ocorre apenas no momento da colheita, após a maturação das plantas (R₈), as perdas são menos expressivas, cerca de 1,3%, devido à dificuldade no recolhimento das plantas pelas colhedoras (WEBER; FEHR, 1966).

3.3.3 Influência do ambiente

3.3.3.1 *Temperatura*

A soja é planta com metabolismo fotossintético C₃ sujeita à fotorrespiração. Logo, a temperatura é fator que afeta diretamente no crescimento e desenvolvimento dessa planta. Temperaturas médias diurnas em torno de 25 a 30 °C com noites mais frias tendem a favorecer o crescimento da planta, pois permite atingir a taxa fotossintética máxima durante o dia e menor

respiração durante a noite, o que resulta em maior acúmulo de carboidratos na planta (TAIZ et al., 2016). Dessa forma, regiões de maior altitude, que geralmente apresentem essas condições de temperatura durante o ciclo da cultura, tendem a favorecer o acamamento das plantas, pois tendem a crescer mais.

Estudos mostram que ao longo do tempo, cultivares com maior resistência ao acamamento diminuíram a temperatura próximo ao dossel da planta, pois mantêm a planta ereta, com maior circulação de ar (KEEP et al., 2016), o que favorece maior eficiência fotossintética, bem como maior produtividade.

3.3.3.2 Radiação solar

A radiação solar pode influenciar no acamamento da soja de diferentes maneiras. Por exemplo, a soja é estimulada a alongar o comprimento dos internódios na falta de luz sob o meristema apical, devido ao sombreamento (ZHANG et al., 2020). Esse fato afeta diretamente à altura da planta e o diâmetro da haste, que são atributos relacionados ao acamamento (RAZA et al., 2019).

Além disso, estudos mostram que o comprimento do internódio é afetado pela radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e pela relação entre o comprimento de ondas do vermelho curto e vermelho longo que chega até a planta (HITZ et al., 2019). Quanto menor o valor da RFA e da relação entre vermelho curto e vermelho longo, maior será o comprimento dos internódios, o que aumenta a chance de ocorrer acamamento.

3.3.4 Influência do genótipo

3.3.4.1 Comprimento de internódio

A morfologia da haste exerce grande influência sobre o acamamento da soja. Estudos mostram que o número de nós, comprimento dos internódios, altura da planta e diâmetro da haste estão diretamente ligados ao acamamento. Plantas mais altas geralmente tendem a ser mais propensas a acamar. Para tentar solucionar esse problema, foi descoberto um gene responsável por conferir internódios curtos na haste das plantas de soja. Genótipos que possuem esse gene apresentam planta mais baixa, sem diminuir o número de nós, componente importante para determinar a produtividade final (OKI et al., 2018). Hormônios vegetais, a exemplo da

auxina, também estão relacionados ao alongamento dos internódios e, por consequência, à altura da planta (JIANG et al., 2020). Por ser planta com alta plasticidade, a soja altera sua morfologia de acordo com a densidade de semeadura. De modo geral, quanto maior a densidade de semeadura, maior será a altura de planta, maior será o comprimento dos internódios e menor será a porcentagem de interceptação de radiação fotossinteticamente ativa pela planta, o que pode resultar em maior acamamento (BOARD, 2001).

Desenvolver plantas de soja com menor altura e manter a produtividade é uma tendência. Cultivares mais precoces tendem a possuir menor altura de planta e menor acamamento (COBER; MORRISON, 2010).

A altura da planta, apesar de ser importante, não deve ser analisada de forma isolada. Estudo realizado com cultivares determinadas e semi-determinadas mostrou que pode haver plantas altas e resistentes ao acamamento, assim como plantas baixas suscetíveis (RAJKUMAR; SINGH; MURLIDHARAN, 2014). Isso evidencia que é possível desenvolver plantas mais altas e manter a resistência ao acamamento, mas para isso é necessário entender todas as variáveis envolvidas no processo.

3.3.4.2 Composição bioquímica da haste

O acúmulo de carboidratos na haste da soja, principalmente celulose, lignina e hemicelulose, tem mostrado relações expressivas com o acamamento (HUSSAIN et al., 2019). A celulose e a lignina são os dois compostos orgânicos mais abundantes nas plantas. Com isso, estima-se que 30% de todo carbono que existe no planeta está presente na forma de lignina (BOERJAN; RALPH; BAUCHER, 2003). Tanto a lignina quanto a celulose compõem a parede celular das plantas e estão relacionados com a sustentação da planta. Além disso, genótipos de soja apresentam variações nos teores de lignina e celulose, os quais influenciam no acamamento.

Além dos aspectos genéticos, a síntese de lignina pode ser influenciada por diversos fatores ambientais, tais como temperatura, déficit hídrico, radiação solar, injúrias mecânicas, nutrição mineral, gases atmosféricos, ataque de patógenos, entre outros fatores (MOURA et al., 2010). A RFA é o componente ambiental que mais compromete a síntese de lignina na cultura da soja, e sua baixa intensidade faz com que a haste da planta se torne mais frágil e acame (LIU et al., 2019b).

Foi reportado que cultivar de soja resistente ao acamamento possui maior teor de lignina na haste em relação a cultivar suscetível ao acamamento, mesmo quando avaliada em diferentes condições ambientais (LIU et al., 2018), o que evidenciou ser possível controlar o teor de lignina na planta geneticamente para desenvolver cultivares mais resistentes ao acamamento.

A síntese de celulose na haste, assim como a lignina, também possui relação direta com o acamamento. Estudos mostram que o teor de celulose varia entre cultivares resistentes e suscetíveis ao acamamento. Quanto maior o teor de celulose, maior é a resistência ao acamamento da planta (LIU et al., 2016). Foi reportado que o teor de lignina parece mais relevante que o teor de celulose em cultivares de soja resistentes ao acamamento (WEN et al., 2020). Além disso, foi reportado que a expressão das enzimas envolvidas na síntese de lignina foi maior em plantas resistentes ao acamamento (WEN et al., 2020).

Para as cultivares de soja cultivadas no Brasil ainda há pouca informação sobre a variação dos teores de lignina e celulose na haste e sua relação com o acamamento.

3.3.4.3 Resistência física da haste

A resistência ao acamamento também pode ser representada pela força necessária para romper a haste na seção próximo ao solo. Diversos trabalhos mostram que quanto maior for a força necessária para romper a haste, maior é a resistência dessas plantas ao acamamento (CHEN et al., 2011). A força da haste tende a aumentar ao longo do ciclo da cultura com o acúmulo de carboidratos na haste. Cultivares resistentes ao acamamento necessitam de maior força para serem quebradas, cerca de 200 N, comparados a 160 N de cultivar suscetível, aos 58 dias após emergência (LIU et al., 2016).

A luz solar é fator que afeta diretamente na força de resistência da haste. Em soja cultivada consorciada com milho, em condições normais e aos 48 dias após emergência, foi observado que a haste precisava de aproximadamente 140 N para ser rompida, mas sob condição de sombreamento, a mesma cultivar necessitou de apenas 40 N de força para ser rompida. Isso indica que o ambiente pode influenciar na resistência da haste (RAZA et al., 2019). Para as cultivares brasileiras ainda foi pouco explorado a relação entre a força de resistência ao rompimento da haste com o acamamento.

3.3.4.4 Anatomia e estrutura da haste

A proporção dos tecidos e componentes estruturais da haste da soja podem variar, e essa alteração histológica pode aumentar ou diminuir a resistência da planta ao acamamento. A proporção de xilema em relação ao parênquima medular é diferente no primeiro internódio da haste de cultivares resistentes e suscetíveis. Quanto maior a área do xilema e maior proporção do xilema em relação ao parênquima medular, maior a resistência ao acamamento (LIU et al., 2019a). Para as cultivares brasileiras ainda foi pouco explorado a relação entre a área do xilema de diferentes cultivares e o acamamento.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição do local

O experimento foi realizado na área experimental da Universidade Estadual do Centro-Oeste (Unicentro), *campus* Cedeteg, (25°23' S 51°29' O, altitude 1031 m) em Guarapuava, Paraná, Brasil.

O clima do local é temperado de altitude (Cfb - Köppen-Geiger) (ALVARES et al., 2013). O solo do local é classificado como Latossolo Bruno (MICHALOVICZ et al., 2019) e a sua caracterização química (0-20 cm) e física está apresentada na Tabela 1. A cultura antecessora foi batata, conduzida sob sistema convencional na safra de verão. No inverno foi semeado aveia preta (*Avena sativa*) cv. Embrapa 139 para cobertura do solo e adubação verde.

Tabela 1 - Análise química e física do solo na área que foi implantado o experimento. Guarapuava, Paraná, Brasil.

Prof. cm	MO g dm ⁻³	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC pH 7,0	V	Argila	Silte	Areia
				cmolc dm ⁻³					%				
0-20	43,1	5,22	3,3	0,49	3,92	1,31	0	4,68	10,4	55	53	28	19

Prof.: profundidade; P e K determinados pelo método de Mehlich; MO: matéria orgânica; V: saturação por bases; CTC: capacidade de trocas cátions.

4.2 Delineamento experimental e instalação dos tratamentos

O delineamento utilizado foi de blocos casualizados com três repetições. Cada parcela foi composta por 5 linhas de 4 m, com espaçamento entre linha de 0,45 m, totalizando 9 m². A densidade de semeadura foi de 30 plantas m⁻².

No dia 13/11/2020 foram semeadas 26 cultivares de soja que foram lançadas ao longo dos últimos 54 anos (Tabela 2). Os genótipos que não são mais produzidos para comercialização foram oriundos de sementes de segunda geração (S2), obtidas originalmente na Embrapa Soja em 2015 (protocolo nº 21199.001171/2015-41) e multiplicadas. As demais sementes foram obtidas dos obtentores.

Tabela 2 - Lista de cultivares com seu respectivo ano de lançamento, hábito, ciclo de crescimento e período reprodutivo durante o experimento.

Ano	Cultivar	Hábito de Crescimento	Ciclo	Ciclo dias	Período reprodutivo
1966	Santa Rosa	D	Médio-tardio	166	81
1973	IAS-3	D	Médio-tardio	157	70
1974	Paraná Marrom	D	Precoce	137	78
1976	Viçoja	D	Médio-tardio	157	83
1979	BR4	D	Médio-precoce	150	66
1985	Ocepar 3 - Primavera	I	Precoce	137	92
1985	Ocepar 4 - Iguaçu	D	Médio-precoce	144	85
1988	FT Abyara	D	Médio	150	78
1989	FT Cometa	I	Precoce	129	80
1990	FT-11 Alvorada	D	Médio-tardio	166	77
1991	BR36	D	Médio-precoce	157	75
1995	Embrapa 48	D	Médio-precoce (6.8)	145	83
1999	CD 206	D	Médio-tardio	144	94
2007	BMX Apolo	I	Precoce (5.5)	125	73
2007	BRS 282	D	Médio-precoce (6.9)	150	85
2007	BMX Potência	I	Precoce (6.7)	137	79
2008	Nidera 5909	I	Precoce (6.2)	137	72
2009	BRS 284	I	Precoce (6.3)	129	72
2011	AFS 110	I	Precoce (6.3)	145	77
2012	TMG 7262 RR	SD	Precoce (6.2)	137	72
2013	95R51	I	Precoce (5.5)	110	72
2014	ROTA54 IPRO	I	Precoce (5.4)	122	69
2014	M5892IPRO	SD	Precoce (5.7)	139	68
2015	BMX Ícone	I	Médio-precoce (6.8)	144	78
2016	96Y90	I	Médio-precoce (6.9)	129	78
2018	BMX Zeus	I	Precoce (5.5)	129	91

I = indeterminada; D = determinada; SD semi-determinada.

4.3 Avaliações

4.3.1 Avaliação destrutiva aos 70 dias após emergência

Aos 70 dias após emergência foram coletados 0,36 m² (10 plantas) de área útil de cada parcela. Na mesma avaliação, também foram coletadas as raízes presentes num monólito de 0.032 m³ (40 cm × 40 cm × 20 cm de comprimento, largura e espessura, respectivamente), de modo que a linha de semeadura estivesse no centro. Foi mensurado os seguintes atributos: altura da planta, número de nós na haste principal, número de ramos, comprimento e diâmetro do primeiro, segundo, terceiro e quarto internódio, resistência da haste, teores de lignina e celulose,

teores de Ca, K, Mn e Cu, índice de área foliar (IAF) e massa seca da haste, folhas e raízes. Também foram coletadas três plantas por parcela de quatro cultivares, duas cultivares resistentes (BMX Apolo e NA5909) e duas suscetíveis (IAS3 e Viçoja) ao acamamento, para realizar a análise histológica da haste.

Os internódios foram nomeados da seguinte forma: 1º internódio: do solo ao nó cotiledonar; 2º internódio: do nó cotiledonar ao nó das folhas unifolioladas; 3º internódio: das folhas unifolioladas ao nó do primeiro trifólio; 4º internódio: nó do primeiro trifólio ao nó do segundo trifólio. O diâmetro foi mensurado em dois pontos no meio de cada internódio.

A resistência da haste foi calculada de acordo com a metodologia proposta por Liu et al. (2019a). Para isso, foram removidos das 10 plantas uma seção da haste de 20 cm de comprimento a partir do solo. Em seguida, foi testada a força (N) necessária para romper essa seção da haste, por meio de ensaio de flexão de 3 pontos através de máquina universal de ensaios (Shimadzu – SLFL 100KN), na qual a haste foi apoiada em uma base, e 10 cm acima estava a placa de pressão, centralizou-se o quarto internódio, que recebeu a força aplicada. Com o valor da pressão e a área transversal da haste, obtida pelo diâmetro da haste, foi calculado a resistência ao rompimento da haste, através da Equação 1:

$$\text{Resistência da haste (N mm}^{-2}\text{)} = \frac{\text{força necessária para romper a haste (N)}}{\text{área transversal do internódio (mm}^2\text{)}} \quad (1)$$

A mesma seção da haste utilizada para calcular a resistência foi utilizada para determinação dos nutrientes, além de lignina e celulose. Para isso, elas foram secas em estufa sob circulação de ar forçado a 60 °C até atingirem massa constante e, em seguida, moídas em fragmentos de cerca de 0,75 mm de diâmetro em moinho de facas tipo Wiley.

Para determinação dos nutrientes, 0,25g de cada amostra foi digerida em forno microondas com ácido nítrico (65% P.A.), sob temperatura de 170 °C e pressão de 20 bar. A determinação de Ca, Mn e Cu foi realizada por meio de espectrometria de absorção atômica (Agilent Technologies – 55AA). Já o K foi determinado por meio de fotometria de chama (Micronal – B462).

Os teores de lignina e celulose foram determinados pelo método de Kjeldahl. Para isso, primeiro foi determinado a massa seca total a 105 °C. Em seguida, 0,25g de amostra seca foram acondicionadas em pacotes de TNT e digeridas em detergente ácido, com auxílio de determinador de fibras (Tecnal TE-190) por 90 minutos a 90 °C. Depois, as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 12 h e pesadas. Em seguida, cada amostra foi digerida com 30 mL de ácido sulfúrico 72% por 3 horas, enxaguadas em água destilada e, logo após, secas em estufa

a 105 °C por 12h para posterior pesagem. O teor de lignina foi calculado com base na matéria não digerida e, o de celulose, com base no peso da amostra digerida em detergente ácido menos a lignina.

A área foliar foi estimada por integrador de área foliar de bancada (LiCor, modelo LI 3100), e com base na massa seca, estimou-se a área foliar específica. Em seguida, por meio da massa seca total e da densidade de semeadura foi estimado o índice de área foliar (IAF). A massa seca das folhas, da haste e da raiz foi obtida por meio de secagem sob circulação de ar forçado a 60 °C até atingir massa constante.

Para as análises histológicas, em cada uma das plantas foi removido o 4º internódio e fixado com formaldeído (5%), ácido acético (5%) e álcool etílico (50%) (FAA 50%). Em seguida, as amostras foram cortadas com navalha em seções transversais, para serem acondicionadas em lâminas de microscopia. Para facilitar a visualização, as amostras foram coradas com azul de toluidina por 30 segundos. Foi utilizado microscópio óptico (Olympus CX23) com aumento de 40x para visualizar e fotografar os tecidos. As amostras foram integralmente fotografadas com auxílio de lupa de bancada (Olympus SZ61), para visualizar e fotografar a área do xilema, parênquima medular e a área total da seção. A mensuração das áreas foi feita com o programa Photoshop CS6®.

4.3.2 Avaliação de acamamento

Foi realizada avaliação visual das parcelas quanto ao índice de acamamento aos 70 dias após emergência no ponto de colheita (estádio fenológico R₈). A escala para nota visual de acamamento foi de 1 a 5, sendo: 1 – Todas as plantas eretas; 2 – Todas as plantas levemente inclinadas ou poucas plantas caídas; 3 – Todas as plantas moderadamente inclinadas, ou 25% a 50% das plantas caídas; 4 – Todas as plantas bem inclinadas, ou de 50% a 80% das plantas caídas; 5 – Quase todas as plantas caídas (CARTTER et al., 1961).

Além disso, foi calculado o índice de resistência ao acamamento (IRA) das cultivares de soja (WEN et al., 2020), pela Equação 2:

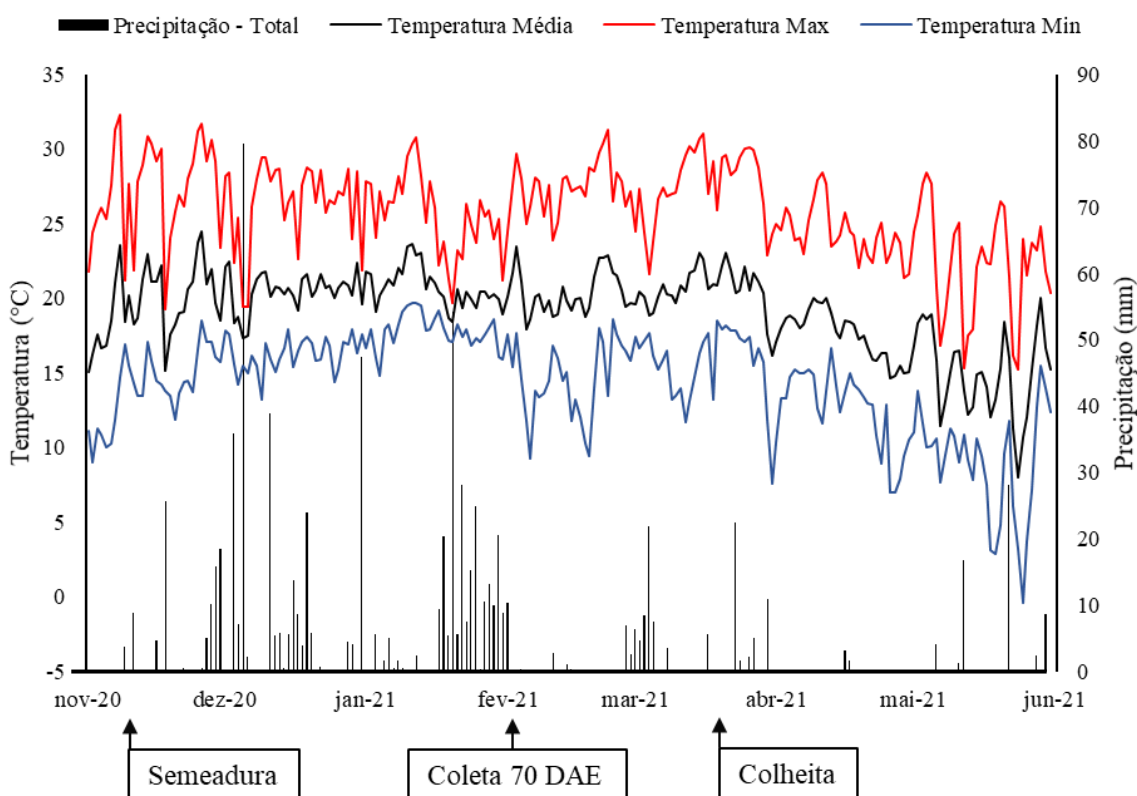
$$\text{IRA (m s}^{-2}\text{)} = \frac{\text{Resistência da haste (N)} \cdot \text{diâmetro do 4º internódio (mm)}}{\text{MS da parte aérea (g)} \cdot \text{altura (cm)}} \quad (2)$$

4.3.3 Produtividade e seus componentes

A colheita das cultivares precoces iniciaram em 25/03/2021. Quando as plantas atingiram a maturação fisiológica (R₈), foram coletados 3,38 m² da área útil de cada parcela. Desse total, foram amostradas de forma aleatória 10 plantas de cada parcela para avaliar o número de vagens por área (inclusive as vazias), peso de mil sementes e partição de massa seca. O índice de colheita foi calculado pela relação da massa seca de sementes pela massa seca da haste e das vagens (sem os grãos) em R₈. O restante das plantas foi trilhado em colhedora de parcelas Wintersteiger (Classic A-4910), para determinação da produtividade. O número de sementes por área e número de sementes por vagens foi calculado com base na relação de produtividade, peso de mil sementes e número de vagens. A produtividade e peso de mil sementes foram ajustados para 13% de umidade.

4.4 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos junto ao Simepar, em estação localizada ao lado do experimento. A precipitação total durante todo o ciclo foi de 832 mm e a amplitude térmica foi de 7,6 a 32,3 °C (Figura 2).



Fonte: Simepar, 2021.

Figura 2 - Dados meteorológicos para a safra 2020/2021 (de novembro até maio): precipitação, temperatura máxima, mínima e média diária em Guarapuava, PR, Brasil.

4.5 Análise estatística

Foi utilizada correlação de Pearson (r) ($p < 0,05$) e o coeficiente angular (a). Para isso, foi alocado na abscissa o ano de lançamento das cultivares e observado a tendência temporal das variáveis resposta, por meio do *software* Microsoft Excel 2016.

Foi realizada análise de variância ($p < 0,05$) para verificar se havia diferença entre a área do xilema e parênquima medular das cultivares. Quando detectada diferença significativa, as médias foram separadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), utilizando o programa Sisvar 5.6.

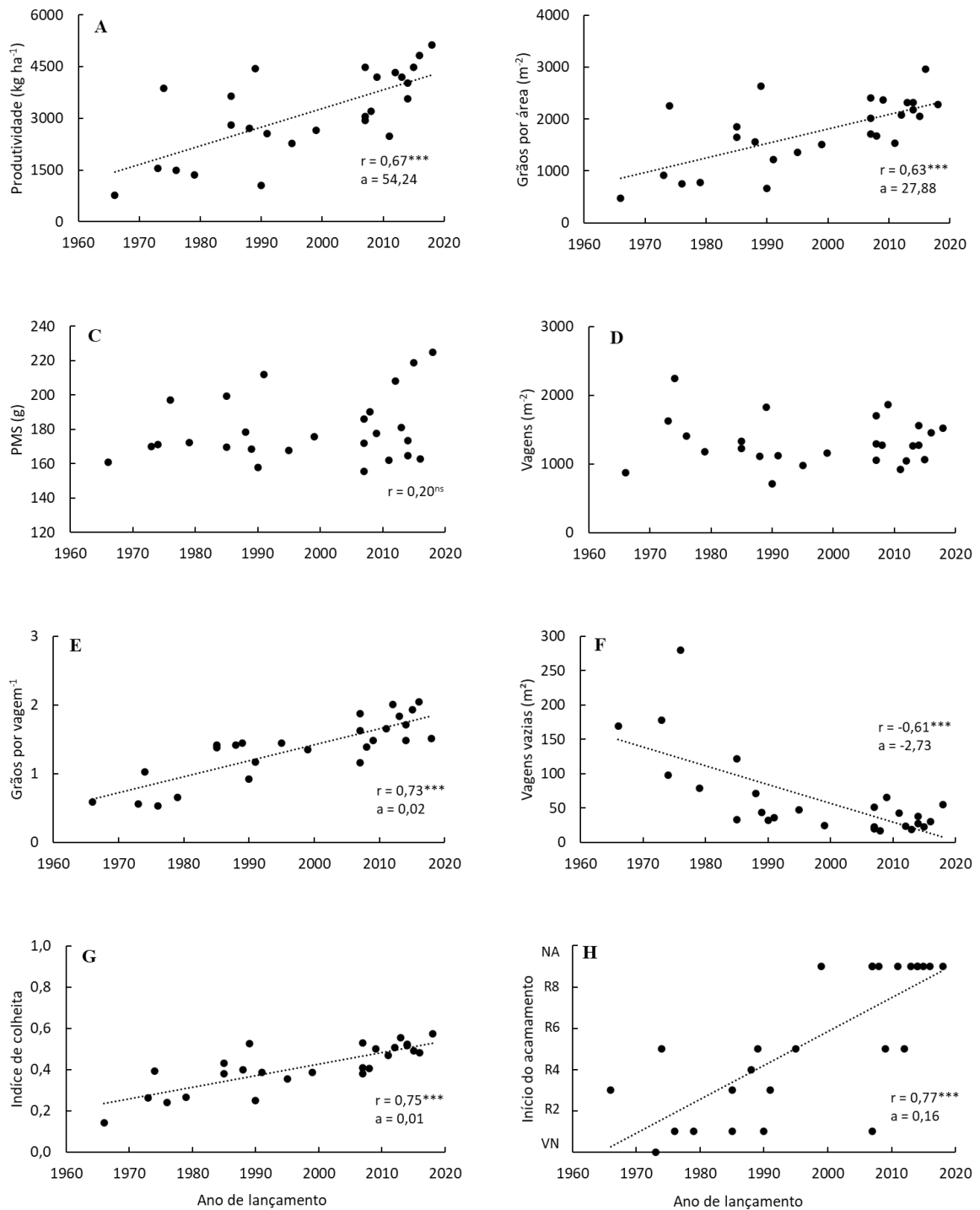
5 RESULTADOS

5.1 Produtividade

A produtividade da soja aumentou de forma linear ao longo do tempo, e apresentou correlação positiva significativa com o ano de lançamento ($p < 0,001$). Variou de 760 kg ha⁻¹ na cultivar lançada em 1966 para 5126 kg ha⁻¹ na cultivar lançada em 2018 (Figura 3a), que representa aumento de 675% em 52 anos. O ganho genético calculado foi de 54,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹.

5.1.1 Tendência dos componentes produtivos ao longo do tempo

O número de sementes por área apresentou correlação positiva com o ano de lançamento das cultivares, com aumento de 28 sementes m⁻² ano⁻¹ (Figura 3b). O peso de mil sementes se manteve constante ao longo do tempo, variando de 156 a 225 g (Figura 3c). O número de vagens por área também se manteve constante ao longo do tempo, variando entre 717 a 2245 vagens m⁻² (Figura 3d). O número de sementes por vagem apresentou correlação positiva com o ano de lançamento das cultivares, com ganho de 0,02 sementes vagem⁻¹ ano⁻¹ (Figura 3e). O número de vagens vazias apresentou correlação negativa com os anos de lançamento das cultivares, com diminuição de 2,73 vagens vazias m⁻² ano⁻¹ (Figura 3f). O índice de colheita apresentou correlação positiva com o ano de lançamento das cultivares, com acréscimo de 0,01 ano⁻¹ (Figura 3g). O estágio fenológico em que as plantas começaram a acamar apresentou correlação positiva com o ano de lançamento, ou seja, quanto mais antiga a cultivar, mais cedo acamou (Figura 3h).



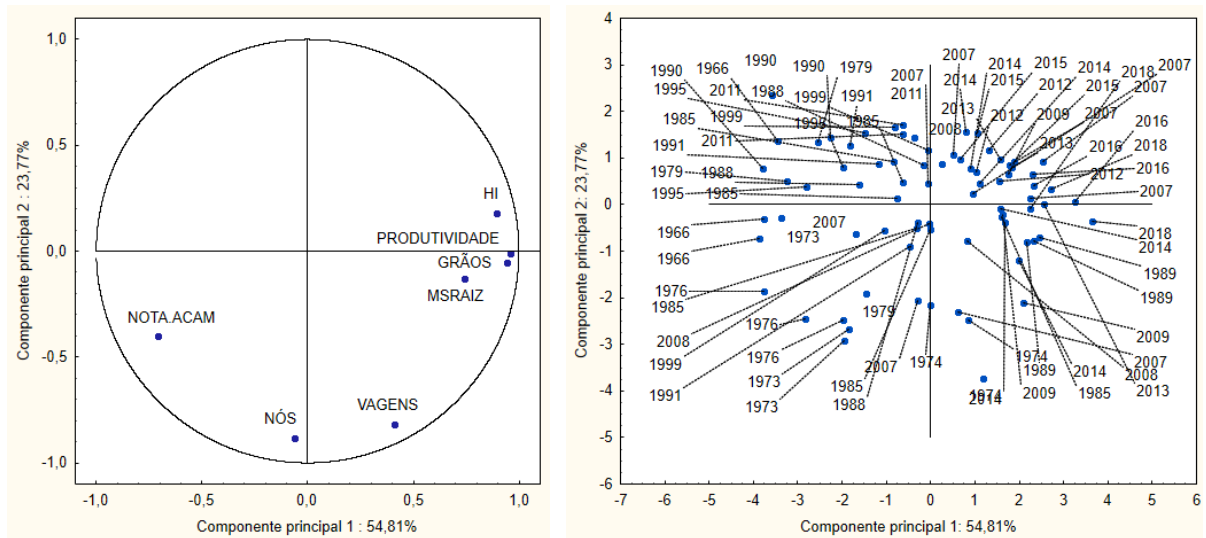
VN – acamou no estágio vegetativo, NA – não acamou; r - correlação de Pearson; a - coeficiente angular. *, ** e *** representa correlação significativa a $p < 0,005$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$, respectivamente. ns – não há correlação significativa.

Figura 3 - Produtividade (A), número de sementes por área (B), massa de mil sementes (PMS) (C), número de vagens por área (D), número de sementes por vagem (E), número de vagens vazias (F), índice de colheita (G) e estágio do início do acamamento (H) relacionados ao ano de lançamento de cultivares de soja na safra 2020/2021.

5.1.2 Análise de componentes principais para produtividade

Os componentes principais 1 e 2 explicam 78,58% da variação que ocorreu.

Por meio da análise de componentes principais é possível observar que as maiores produtividades estão próximas das cultivares mais modernas (Figura 4). Também é possível observar alta correlação entre produtividade, índice de colheita, número de grãos por área e biomassa da raiz. A nota de acamamento aparece inversamente proporcional a esses atributos, ou seja, quanto mais resistente ao acamamento, maior o índice de colheita, maior o número de grãos por área, maior a produtividade e maior a biomassa da raiz.

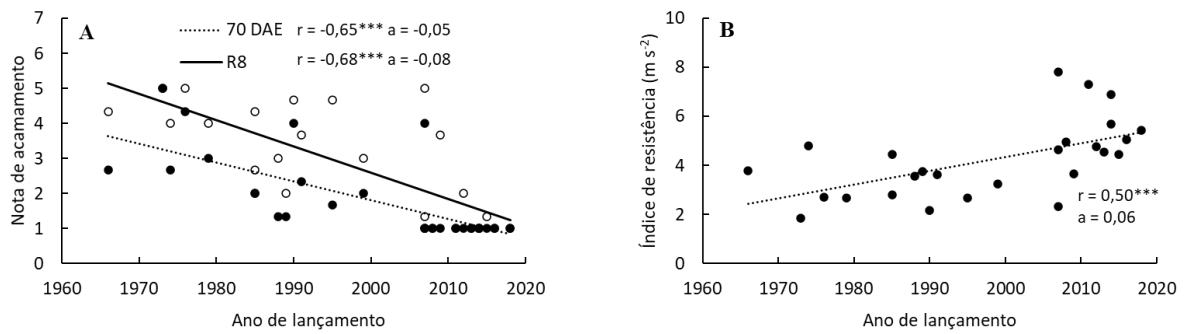


HI – índice de colheita; GRÃOS – número de grãos por área; MSRAIZ – biomassa da raiz; VAGENS – número de vagens por área; NÓS – número de nós por área; NOTA.ACAM – nota de acamamento.

Figura 4 – Análise de componentes principais para produtividade e seus atributos.

5.2 Resistência ao acamamento

As notas de acamamento aos 70 DAE e no estágio R₈ apresentaram correlação negativa com o ano de lançamento das cultivares de soja, e variaram de 5 para 1 ao longo do tempo, com redução anual da nota de 0,05 e 0,08 quando avaliado em 70 DAE e R₈, respectivamente (Figura 5^a). O índice de resistência ao acamamento apresentou correlação positiva com o ano de lançamento das cultivares, variou de 1,75 m s⁻² a 7,82 m s⁻² ao longo do tempo, com um incremento anual de 0,06 m s⁻² (Figura 5b).



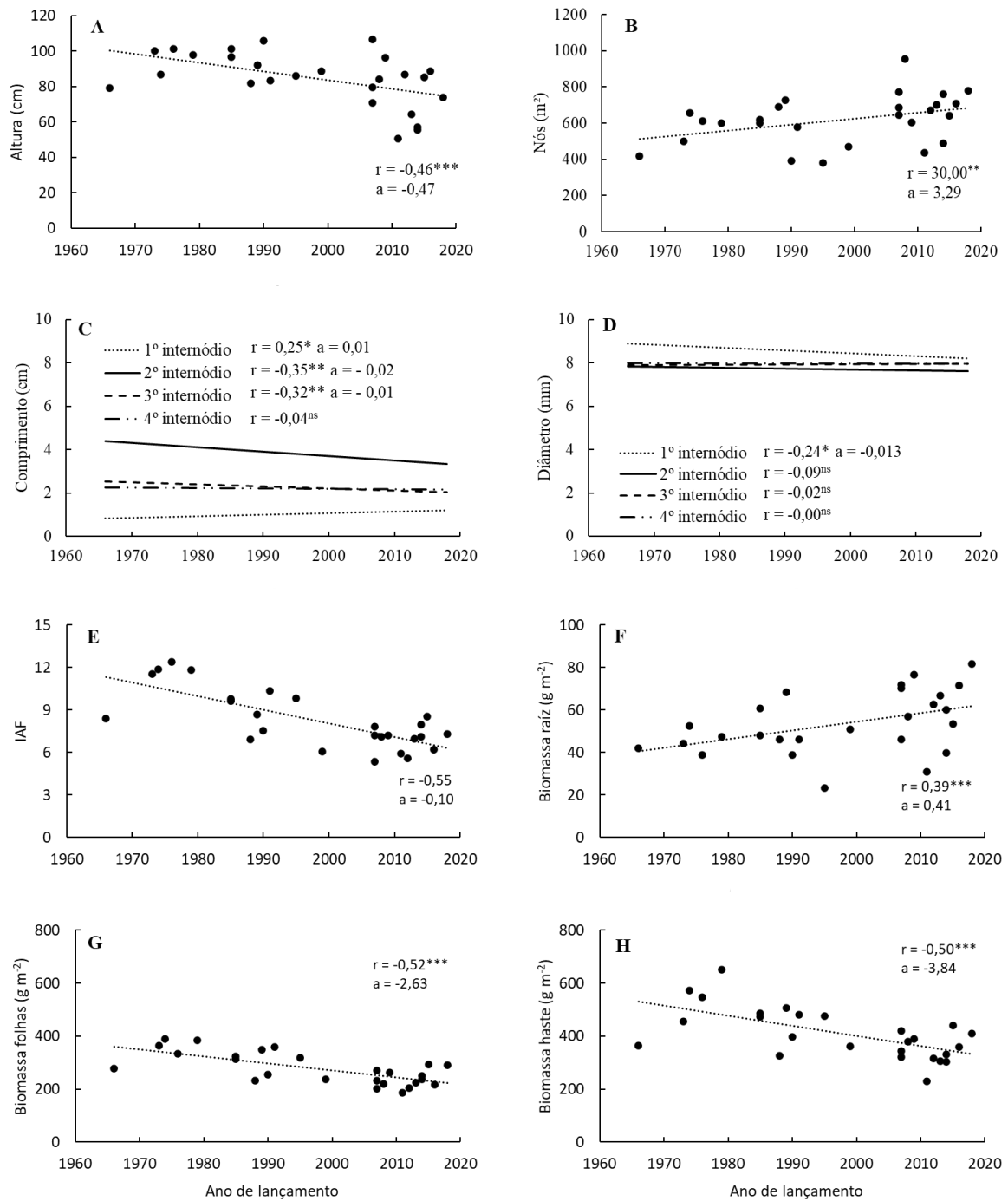
r – correlação de Pearson; R² - coeficiente de determinação; a – coeficiente angular. *** correlação significativa $p < 0,001$.

Figura 5 – Nota de acamamento aos 70 dias após emergência e no ponto de colheita (A) e índice de resistência ao acamamento (B) relacionados ao ano de lançamento de cultivares de soja na safra 2020/2021.

5.2.1 Atributos morfológicos da planta de soja aos 70 DAE

A altura de planta teve correlação negativa com o ano de lançamento, variando de 50 a 106 cm de altura, com diminuição de 0,46 cm ano⁻¹ (Figura 6^a). O número de nós por área apresentou correlação positiva com o ano de lançamento, variando entre 380 a 952 nós m⁻² ao longo do tempo, com incremento médio anual de 3,29 nós m⁻² (Figura 6b). O comprimento do primeiro internódio teve correlação positiva com o ano de lançamento das cultivares, variando de 0,5 a 1,7 cm ao longo do tempo, com incremento anual de 0,01 cm (Figura 6c). O segundo e terceiro internódio apresentaram correlação negativa com o ano de lançamento das cultivares, variando de 2 a 5,6 cm e 1,3 a 3,1 cm respectivamente, com redução anual de 0,02 e 0,01 cm, respectivamente (Figura 6c). O diâmetro do primeiro internódio apresentou correlação negativa com o ano de lançamento das cultivares, e variou entre 7,7 e 9,5 mm, com diminuição anual de 0,01 mm (Figura 6d). O diâmetro do segundo, terceiro e quarto internódio permaneceram constantes ao longo do tempo. O IAF apresentou correlação negativa com os anos de lançamento das cultivares, variando de 5,4 a 12,4, com diminuição de 0,1 ano⁻¹ (Figura 6e). A massa seca da raiz teve correlação positiva com os anos de lançamento das cultivares, variando de 23,4 a 81,6 g m⁻², com aumento de 0,41 g m⁻² ano⁻¹ (Figura 6f). A massa seca das folhas teve correlação negativa com o ano de lançamento das cultivares, variou de 186 a 389 g m⁻² com diminuição de 2,63 g m⁻² ano⁻¹ (Figura 6g). A massa seca da haste teve correlação negativa

com o ano de lançamento das cultivares, variou de 230 a 652 g m⁻² com diminuição de 3,84 g m⁻² ano⁻¹ (Figura 6h).

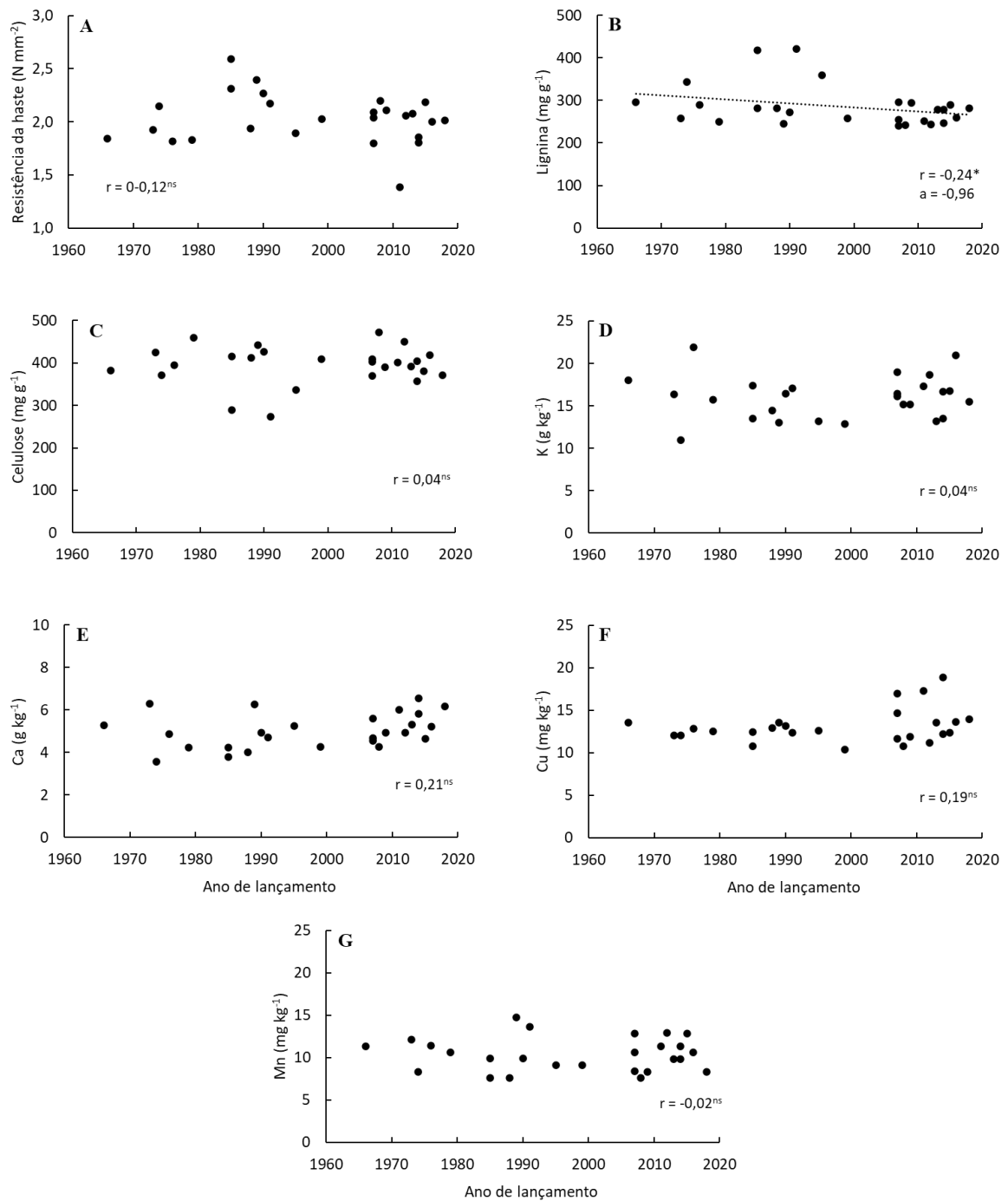


r – correlação de Pearson; R^2 – coeficiente de determinação; a – coeficiente angular. *, ** e *** representa correlação significativa à $p < 0,005$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$, respectivamente. Ns – não há correlação significativa.

Figura 6 – Altura da planta (A), número de nós por m^2 (B), comprimento dos primeiros internódios (C), diâmetro dos primeiros internódios (D), índice de área foliar (IAF) (E), massa seca da raiz (F), massa seca das folhas (G) e massa seca da haste (H) aos 70 dias após emergência relacionados ao ano de lançamento de cultivares de soja na safra 2020/2021.

5.2.2 Atributos estruturais, nutricionais, e histológicos da haste

A resistência da haste de soja ao rompimento não se alterou ao longo do tempo, variou entre 1,38 e 2,59 N mm⁻² (Figura 7a). O teor de lignina da haste teve correlação negativa com o ano de lançamento das cultivares, e variou de 241 a 422 mg g⁻¹ de massa seca e diminuição de 0,96 mg g⁻¹ ano⁻¹ (Figura 7b). O teor de celulose da haste não se alterou ao longo do tempo, variou de 273 a 472 mg g⁻¹ de massa de seca (Figura 7c). Os teores dos macronutrientes K (Figura 7d) e Ca (Figura 7e) na haste não se alteraram ao longo do tempo, variaram de 10,93 a 21,91 g kg⁻¹ e 3,55 a 6,53 g kg⁻¹, respectivamente. Os teores dos micronutrientes Cu (Figura 7f) e Mn (Figura 7g) na haste não se alteraram ao longo do tempo, variaram de 10,38 a 18,37 mg kg⁻¹ e 7,55 a 14,75 mg kg⁻¹, respectivamente.



r - correlação de Pearson; R^2 - coeficiente de determinação; a - coeficiente angular. * correlação significativa à $p < 0,05$. ns – não há correlação significativa.

Figura 7 – Resistência da haste ao rompimento (A) e teor de lignina (B), celulose (C), potássio (D), cálcio (E), cobre (F) e manganês (G) na haste de soja avaliados aos 70 dias após emergência relacionados a o ano de lançamento de cultivares de soja na safra 2020/2021.

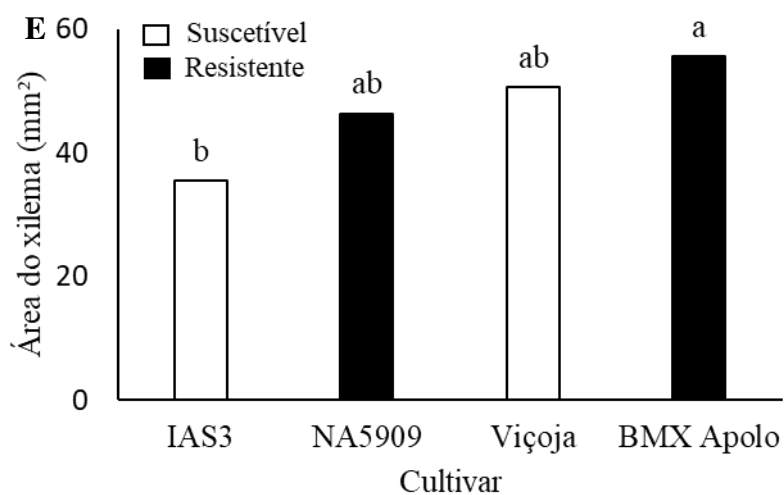
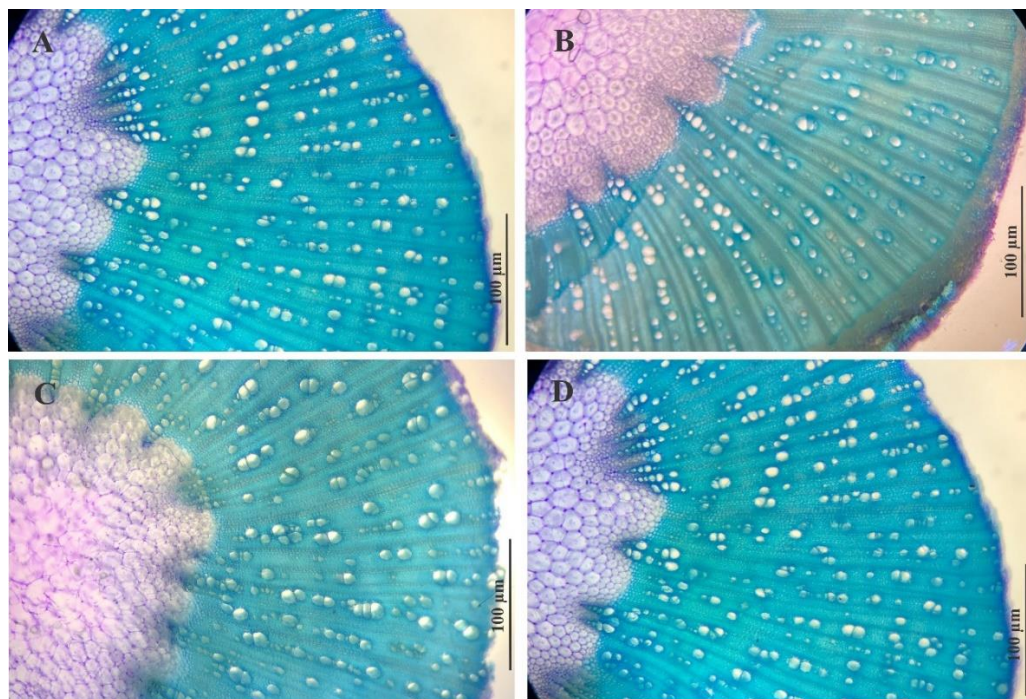
Na análise histológica do quarto internódio da haste com cultivares resistentes e suscetíveis foi observado diferença significativa para a área do xilema (Tabela 3). A área da medula e a proporção do xilema em relação a medula não diferiram entre as cultivares.

Tabela 3 – Dados da análise de variância para área do xilema, área da medula e proporção do xilema entre cultivares de soja resistentes e suscetíveis ao acamamento.

	valor- <i>p</i>	CV (%)	Média
Área do xilema (mm ²)	0,02*	28,25	47,08
Área da medula (mm ²)	0,54 ^{ns}	22,98	7,85
Proporção do Xilema (%)	0,08 ^{ns}	37,1	15,24

* significativa a $p < 0,05$ pela análise de variância. ^{ns} não significativo. CV – coeficiente de variação.

A cultivar BMX Apolo, resistente ao acamamento, apresentou maior área de xilema do que a cultivar IAS3 (suscetível ao acamamento) (Figura 8).



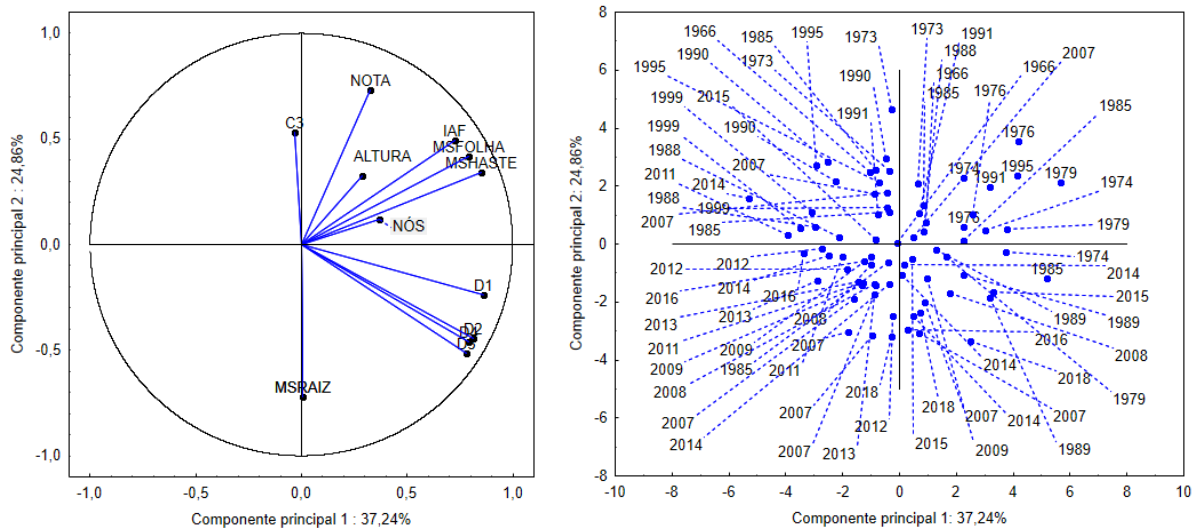
Médias com letras diferentes diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). A cor azul representa a área do xilema e a cor roxa da medula. IAS3 e Viçoja possuem nota 5 de acamamento. BMX Apolo e NA5909 possuem nota 1 de acamamento.

Figura 8 – Corte transversal do 4º internódio da haste de cultivares de soja resistentes e suscetíveis ao acamamento. Cultivar NA5909 (A), BMX Apolo (B), IAS3 (C) e Viçoja (D). Área do xilema das cultivares (E).

5.2.3 Análise componentes principais para acamamento

Os componentes principais 1 e 2 explicam 62,1% da variação que ocorreu.

É possível observar que existe uma tendência de que, quanto maior a nota de acamamento (quanto mais suscetível ao acamamento) maior é a altura, o índice de área foliar (IAF) e a biomassa das folhas (MSFOLHAS) e da haste (MSHASTE) (Figura 9). Também é possível observar que quanto maior a nota, menor é a biomassa das raízes (MSRAIZ) e maior é o diâmetro dos internódios (D1, D2, D3 e D4). Outro aspecto interessante de observar é que as cultivares mais antigas possuem maior IAF, biomassa de parte aérea e altura de planta, enquanto as mais novas possuem maior diâmetro de haste e maior biomassa de raiz.



MSRAIZ – biomassa da raiz; NOTA – nota de acamamento em R8; IAF – índice de área foliar; MSFOLHA – biomassa das folhas; MSHASTE – biomassa da haste; MSRAIZ – biomassa da raiz; NÓS – número de nós totais na planta; D1, D2, D3 E D4 – diâmetro do primeiro ao quarto internódio.

Figura 9 – Análise componentes principais para índice de acamamento na soja.

6 DISCUSSÃO

6.1 Produtividade

O ganho genético de 54,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 3a) na produtividade é similar ao de outros trabalhos realizados no Brasil, que encontraram valores de 43 e 50 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (UMBURANAS, 2019) e 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (TODESCHINI et al., 2019). Esse valor pode ser considerado alto se comparado ao de outros países, como por exemplo dos Estados Unidos da América, segundo maior produtor mundial, que observaram incremento médio anual de 12,4 a 21,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo do grupo de maturação (ROGERS et al., 2015). Na Argentina, terceiro maior produtor mundial do grão, o ganho genético foi de 43 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (DE FELIPE; GERDE; ROTUNDO, 2016) ou então China, quarto maior produtor mundial, em que o ganho genético anual foi de 6 a 16 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (WU et al., 2015).

O aumento da produtividade da soja pode ser desdobrado pelo número de sementes por área e peso de mil sementes (CUI; YU, 2005). Como não houve alteração no peso de mil sementes ao longo do tempo (Figura 3c), nem no número de vagens (Figura 3d), podemos afirmar que o componente produtivo que influenciou diretamente no incremento da produtividade foi o número de sementes por área, que aumentou mais de 6 vezes da década de 60 para a atual, e variou de 475 a 2964 sementes m⁻² (Figura 3b). Tendência semelhante para o número de sementes por área foi encontrada em outros trabalhos, entretanto, há divergência quanto ao peso de mil sementes, visto que alguns estudos evidenciam aumento ao longo do tempo (UMBURANAS et al., 2019; WU et al., 2015) e outros não observaram aumento (DE FELIPE; GERDE; ROTUNDO, 2016; TODESCHINI et al., 2019).

O aumento no número de sementes por área foi proveniente do maior número de sementes por vagens (Figura 3e) e, principalmente, pelo menor número de vagens vazias por área ao longo do tempo (Figura 3f). O número de sementes por vagem é característica controlada geneticamente e difícil de ser melhorada. Já o número de vagens vazias tem relação com estresses bióticos e abióticos sofridos pelas plantas, como doenças, ataques de insetos e falhas na polinização (BLETTLER; FAGÚNDEZ; CAVIGLIA, 2018; CHIARI et al., 2005). O fato das cultivares antigas acamarem mais (Figura 5) e terem maior área foliar (Figura 6e), fato que demanda maior custo energético e acarreta em microclima úmido próximo ao solo e com menor incidência solar, pode ter feito com que as plantas se estressassem mais, dificultou a entrada de polinizadores e favoreceu o desenvolvimento de doenças e ataques de pragas que, conseqüentemente, levaram a abortar sementes, e aumentou o número de vagens vazias.

Além disso, quanto mais antiga a cultivar, mais cedo ela acamou (Figura 3h), e o acamamento antes do enchimento de sementes leva a menor número de sementes por área e à má formação de sementes (ACQUAAH, 2012). Quando o acamamento ocorre, a dominância apical é perdida. Dessa forma, se a planta acamar no florescimento, o número de vagens da haste principal diminui (WOODS; SWEARINGIN, 1977). É possível que a ocorrência de acamamento após a formação da vagem e antes do início do enchimento de sementes aumente o número de vagens vazias, principalmente na haste, devido a perda de dominância apical.

Outra característica com forte relação ao aumento de produtividade é o índice de colheita. Ao longo do tempo o índice de colheita aumentou cerca de 1% ano⁻¹ (Figura 3g). Estudos mostram que o aumento do índice de colheita está diretamente relacionado a maior taxa fotossintética da planta, eficiência no enchimento de sementes e maior período reprodutivo (LOPEZ; FREITAS MOREIRA; RAINEY, 2021). Essa maior capacidade de direcionar fotoassimilados para produção de sementes possivelmente foi um dos motivos que levou ao aumento do número de sementes por área e redução de vagens vazias.

O aumento na massa das raízes (Figura 6f) também pode ter contribuído para o aumento da produtividade, pois quanto mais profunda e maior é a área ocupada pelas raízes, maior tende a ser a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas.

A produtividade das cultivares mais antigas pode ter sido afetada de forma mais intensa pela menor disponibilidade hídrica no período reprodutivo (Figura 2), visto que o ciclo delas é em grande parte classificado como médio, em comparação com as cultivares modernas que possuem ciclo precoce na maioria dos casos (Tabela 2).

6.2 Resistência ao acamamento

A resistência de cultivares de soja ao acamamento aumentou ao longo do tempo (Figura 5), sendo possível graças às mudanças morfológicas da planta como um todo (Figura 6). A maioria dos atributos relacionados à haste, como resistência, composição química e bioquímica não tiveram variação ao longo do tempo e não contribuíram para o aumento da resistência ao acamamento (Figura 7).

Outros estudos realizados no Brasil também constataram que as cultivares de soja modernas são mais resistentes ao acamamento que cultivares antigas (TODESCHINI et al., 2019; UMBURANAS, 2019), bem como na China (WANG et al., 2016), na Argentina (DE FELIPE; GERDE; ROTUNDO, 2016), nos Estados Unidos da América (USTUN; ALLEN; ENGLISH, 2001) e no Canadá (VOLDENG et al., 1997). Em todos esses locais, com exceção

do Canadá, a redução do acamamento foi acompanhada pela diminuição da altura das plantas de soja, fato que também foi observado nesse experimento, em que as plantas tiveram redução de altura em $0,47 \text{ cm ano}^{-1}$ (Figura 6a).

Já o número de nós na haste principal manteve-se constante ao longo do tempo, mesmo com a diminuição da altura de planta. Entretanto, o número de nós por área aumentou (Figura 6b). Isso mostra que o comprimento médio dos internódios ao longo do tempo diminuiu, característica importante para aumentar a resistência ao acamamento (OKI et al., 2018). Da mesma forma, aumentar o número de nós é importante pois é característica relacionada à produtividade, visto que é a partir deles que as estruturas reprodutivas se desenvolvem (NAVARRO JÚNIOR; COSTA, 2002).

O comprimento do primeiro internódio (hipocótilo) aumentou, do segundo e terceiro diminuiu e o quarto se manteve estável ao longo do tempo (Figura 6c), enquanto o diâmetro do primeiro internódio diminuiu e os demais se mantiveram estáveis (Figura 6d). Estudos mostram que comprimento e diâmetro dos primeiros internódios da soja são importantes para aumentar a resistência da haste (LIU et al., 2015). Entretanto, para as condições brasileiras de cultivo, foi observado que o diâmetro não teve influência no aumento da resistência ao acamamento. Apenas o comprimento do segundo e terceiro internódio diminuíram ao longo do tempo e podem ter contribuído para essa característica.

A biomassa da parte aérea da planta de soja diminuiu ao longo dos anos. A massa seca das folhas reduziu pela metade e a da haste teve redução de quase 3 vezes. É possível observar que, na média, a haste representa mais da metade da massa da parte aérea da planta, e foi na haste que ocorreu a maior variação de peso ao longo dos anos. Isso ajuda a explicar a maior resistência ao acamamento das cultivares modernas, pois plantas mais baixas (Figura 6a) e mais leves tem menor intensidade de força peso (massa x aceleração) que plantas altas e pesadas. Além disso, o centro de gravidade das plantas baixas e leves tende a ser mais próximos do solo quando comparado ao centro de gravidade de plantas altas e pesadas, e isso faz com que se tornem menos susceptíveis ao acamamento (KITABATAKE et al., 2019).

A biomassa da raiz teve incremento de $0,41 \text{ g m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, triplicando o valor de biomassa ao longo do tempo, que passou de $23,4 \text{ g m}^{-2}$ nas cultivares antigas para $81,6 \text{ g m}^{-2}$ nas cultivares modernas (Figura 6f). O aumento da biomassa da raiz pode ter ocorrido pelo aumento do número de raízes primárias, que possuem alta correlação com a resistência ao acamamento (EL SABAGH et al., 2020; KITABATAKE et al., 2019). Estudo realizado com população de 165 linhagens recombinantes endogâmicas de soja, provenientes do cruzamento de cultivar

resistente com cultivar suscetível, mostrou que a altura e o peso das raízes explicam 55% da resistência das plantas ao acamamento (CHEN et al., 2017). É importante observar que esses resultados são limitados à área de solo coletada no trabalho, visto que a coleta de raízes foi realizada num monólito de 0.032m³ (40 cm × 40 cm × 20 cm de comprimento, largura e espessura, respectivamente).

A partição da biomassa de forma equilibrada e com ênfase na raiz da planta de soja é desejável para obter maior resistência ao acamamento. Essa característica é controlada geneticamente, mas também sofre influência do ambiente (ACQUAAH, 2012). Exemplo disso é o efeito do sombreamento na soja, que faz com que o acúmulo de biomassa seja direcionado para o alongamento da haste, o que faz com que a planta cresça em busca de posição com maior incidência solar e, conseqüentemente, faz com que ela acame, pois a haste se torna longa e pouco resistente (YANG et al., 2014).

A resistência da haste ao rompimento é variável diretamente ligada ao acamamento para o cultivo de soja em consórcio com milho, pois nessas condições a haste tende a estiolar e ficar mais frágil (RAZA et al., 2019). No presente trabalho, conduzido sob sistema de monocultura, que é o padrão brasileiro de cultivo de soja, não foi observado nenhuma tendência na força de resistência da haste ao longo do tempo (Figura 7a), mesmo com o aumento da resistência ao acamamento das cultivares.

Os teores de lignina (Figura 7b) e celulose (Figura 7c) também se mantiveram constantes ao longo do tempo. Diversos trabalhos relacionam a resistência da haste aos teores de lignina e celulose na planta, em que quanto maior o teor dessas fibras, maior a resistência da haste (LIU et al., 2016, 2019a). Dessa forma, os valores encontrados para o teor de lignina e celulose nas hastes da soja condiz com a estabilidade da resistência da haste ao longo do tempo.

Os teores de K (Figura 7d), Cu (Figura 7f) e Mn (Figura 7g) na haste das plantas também não apresentaram tendência temporal. O K é importante para o processo de lignificação das células do esclerênquima (IMAS, 1999). Já o Cu e o Mn ativam enzimas necessárias para a síntese de lignina (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Assim, a não alteração do teor desses nutrientes ao longo do tempo condiz com os dados de lignina, que se mantiveram constantes.

O teor de Ca também não apresentou tendência temporal nas hastes das cultivares de soja (Figura 7e). É nutriente que possui importante função na estrutura física da planta, pois compõe os pectatos de cálcio da lamela média da parede celular (TAIZ et al., 2016). Com isso,

os valores de Ca condizem com os valores de resistência da haste, pois ambos se mantiveram constantes ao longo do tempo nas cultivares de soja.

A análise histológica do quarto internódio mostrou que existe diferença entre a área do xilema entre as cultivares (Tabela 3). A diferença ocorreu apenas entre a cultivar IAS3 (suscetível ao acamamento) e BMX Apolo (resistente ao acamamento), que apresentaram 35,6 mm² e 55,6 mm² de área do xilema, respectivamente (Figura 8). Por outro lado, as cultivares Viçoja (suscetível ao acamamento) e NA5909 (resistente ao acamamento) não diferiram entre si na área do xilema. Dessa forma, não é possível afirmar que a área do xilema é a responsável pela maior resistência ao acamamento em cultivares brasileiras. Estudo conduzido com duas cultivares de soja (resistente e suscetível), consorciada com milho, concluiu que cultivares resistentes ao acamamento possuem maior área de xilema e maior proporção de área de xilema com relação a área da medula (WEN et al., 2020). Ao que tudo indica, para as condições e cultivares brasileiras essa relação entre área de xilema e resistência ao acamamento não se aplica.

7 CONCLUSÕES

As cultivares modernas de soja são mais resistentes ao acamamento e mais produtivas que as cultivares antigas. O aumento da produtividade está relacionado principalmente ao aumento do número de sementes por área, obtido pela melhor eficiência na utilização da biomassa nas cultivares modernas.

A resistência ao acamamento das cultivares brasileiras não possui relação com a resistência física, composição química e bioquímica da haste da planta. No sistema de monocultura de soja brasileiro, a resistência ao acamamento das cultivares modernas foi obtida pela redução da biomassa da parte aérea, incremento da biomassa da raiz, menor altura de planta e menor comprimento médio de internódio.

São necessários outros estudos para entender as alterações que ocorreram no sistema radicular da soja que auxiliam na maior resistência ao acamamento das cultivares modernas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACQUAAH, G. **Principles of Plant Genetics and Breeding**. Oxford: Blackwell, 2012.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ANDRADE, G. C. G.; FILHO, R. C.; CUNHA, M. G. DA. Resistance of soybean genotypes to white mold in distinct agroecosystems. **Journal of Neotropical Agriculture**, v. 5, n. 1, p. 7–16, 27 mar. 2018.
- BERRY, P. M. et al. Understanding and reducing lodging in cereals. In: **Advances in Agronomy**. Cambridge: Academic Press, 2004. v. 84p. 217–271.
- BLETTLER, D. C.; FAGÚNDEZ, G. A.; CAVIGLIA, O. P. Contribution of honeybees to soybean yield. **Apidologie**, v. 49, n. 1, p. 101–111, fev. 2018.
- BOARD, J. Reduced lodging for soybean in low plant population is related to light quality. **Crop Science**, v. 41, p. 379–384, 1 mar. 2001.
- BOERJAN, W.; RALPH, J.; BAUCHER, M. Lignin biosynthesis. **Annual Review of Plant Biology**, v. 54, n. 1, p. 519–546, 2003.
- BONATO, E. R.; BONATO, A. L. V. **A soja no Brasil: história e estatística**. Embrapa, , 1987. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/446431>>. Acesso em: 1 set. 2020
- CAMARA, G. M. S. **Soja: tecnologia da producao II**. Embrapa, , 2000. Disponível em: <<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=449702&biblioteca=vazio&b-usca=autoria:%22CAMARA,%20G.M.S.%22&qFacets=autoria:%22CAMARA,%20G.M.S.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>>. Acesso em: 2 set. 2020
- CARTTER, J. et al. Results of the cooperative uniform soybean tests part i. north central states 1961. **U. S. Regional Soybean Laboratory Urbana, Illinois**, 1 jan. 1961.
- CHEN, H. et al. Quantitative trait loci analysis of stem strength and related traits in soybean. **Euphytica**, v. 179, n. 3, p. 485–497, 1 jun. 2011.

CHEN, H. et al. Combining QTL and candidate gene analysis with phenotypic model to unravel the relationship between lodging and related traits in soybean. **Molecular Breeding**, v. 37, n. 4, p. 43, abr. 2017.

CHIARI, W. C. et al. Pollination of soybean (*Glycine max* L. Merrill) by honeybees (*Apis mellifera* L.). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 48, n. 1, p. 31–36, jan. 2005.

COBER, E. R. et al. Genetic improvement rates of short-season soybean increase with plant population. **Crop Science**, v. 45, n. 3, p. 1029–1034, maio 2005.

COBER, E. R.; MORRISON, M. J. Regulation of seed yield and agronomic characters by photoperiod sensitivity and growth habit genes in soybean. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 120, n. 5, p. 1005–1012, mar. 2010.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 3 jul. 2020.

CUI, S.; YU, D. Estimates of relative contribution of biomass, harvest index and yield components to soybean yield improvements in China. **Plant Breeding**, v. 124, p. 473–476, 3 out. 2005.

DE FELIPE, M.; GERDE, J. A.; ROTUNDO, J. L. Soybean genetic gain in maturity groups iii to v in argentina from 1980 to 2015. **Crop Science**, v. 56, n. 6, p. 3066–3077, nov. 2016.

DUCLÓS, N. **A marcha do grão de ouro: soja, a cultura que mudou o Brasil**. Florianópolis: Editora Expressão, 2014.

EL SABAGH, A. et al. Drought and Heat Stress in Cotton (*Gossypium hirsutum* L.): Consequences and Their Possible Mitigation Strategies. In: HASANUZZAMAN, M. (Ed.). **Agronomic Crops**. Singapore: Springer Singapore, 2020. p. 613–634.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 12 maio. 2020.

FEHR, W.; CAVINESS, C. Stages of soybean development. **Special Report**, 1 mar. 1977.

HARBACH, C. et al. Association of green stem disorder with agronomic traits in soybean. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 6, p. 2263–2268, nov. 2016.

- HITZ, T. et al. Morphological response of soybean (*Glycine max* (L.) merr.) cultivars to light intensity and red to far-red ratio. **Agronomy**, v. 9, n. 8, p. 428, 3 ago. 2019.
- HUSSAIN, S. et al. Shade effect on carbohydrates dynamics and stem strength of soybean genotypes. **Environmental and Experimental Botany**, v. 162, p. 374–382, jun. 2019.
- IMAS, P. **Recent Trends in Nutrition Management in Horticultural Crops**. . In: IPI-PRII-KKV WORKSHOP. Dapoli: 1999.
- JIANG, Z. et al. Concentration difference of auxin involved in stem development in soybean. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 19, n. 4, p. 953–964, abr. 2020.
- JIN, J. et al. Agronomic and physiological contributions to the yield improvement of soybean cultivars released from 1950 to 2006 in Northeast China. **Field Crops Research**, v. 115, n. 1, p. 116–123, 4 jan. 2010.
- KATO, S. et al. Effect of change from a determinate to a semi-determinate growth habit on the yield and lodging resistance of soybeans in the northeast region of Japan. **Breeding Science**, v. 69, n. 1, p. 151–159, 2019.
- KEEP, N. R. et al. Changes in physiological traits in soybean with breeding advancements. **Crop Science**, v. 56, n. 1, p. 122–131, jan. 2016.
- KENDALL, S. L. et al. Quantifying lodging-induced yield losses in oilseed rape. **Field Crops Research**, v. 211, p. 106–113, set. 2017.
- KITABATAKE, T. et al. Morphological traits associated with the quantitative trait locus for lodging tolerance in soybean. **Crop Science**, v. 59, n. 2, p. 565–572, mar. 2019.
- KOESTER, R. P. et al. Historical gains in soybean (*Glycine max* Merr.) seed yield are driven by linear increases in light interception, energy conversion, and partitioning efficiencies. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 12, p. 3311–3321, jul. 2014.
- LI, S. et al. Plant architectural responses in simultaneous maize/soybean strip intercropping do not lead to a yield advantage. **Annals of Applied Biology**, v. 177, n. 2, p. 195–210, set. 2020.
- LIU, W. et al. Evaluation of soybean (*glycine max*) stem vining in maize-soybean relay strip intercropping system. **Plant Production Science**, v. 18, n. 1, p. 69–75, jan. 2015.

LIU, W. et al. Relationship between cellulose accumulation and lodging resistance in the stem of relay intercropped soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. **Field Crops Research**, v. 196, p. 261–267, set. 2016.

LIU, W. et al. Effect of shade stress on lignin biosynthesis in soybean stems. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 7, p. 1594–1604, jul. 2018.

LIU, W. et al. Shade stress decreases stem strength of soybean through restraining lignin biosynthesis. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 1, p. 43–53, jan. 2019a.

LIU, W. et al. iTRAQ protein profile analysis of soybean stems reveals new aspects critical for lodging in intercropping systems. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 9, p. 2029–2040, 1 set. 2019b.

LOPEZ, M. A.; FREITAS MOREIRA, F.; RAINEY, K. M. Genetic Relationships Among Physiological Processes, Phenology, and Grain Yield Offer an Insight Into the Development of New Cultivars in Soybean (*Glycine max* L. Merr). **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 651241, 9 abr. 2021.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafós, 1997.

MICHALOVICZ, L. et al. Soil chemical attributes, nutrient uptake and yield of no-till crops as affected by phosphogypsum doses and parceling in southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 3, p. 385–399, 23 fev. 2019.

MONTOYA, M. A. et al. Uma nota sobre consumo energético, emissões, renda e emprego na cadeia da soja no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, v. 73, n. 3, p. 345–369, 20 set. 2019.

MOURA, J. C. M. S. et al. Abiotic and biotic stresses and changes in the lignin content and composition in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 52, n. 4, p. 360–376, abr. 2010.

NAVARRO JÚNIOR, H. M.; COSTA, J. A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 269–274, mar. 2002.

OKI, N. et al. Quantitative trait loci associated with short inter-node length in soybean. **Breeding Science**, v. 68, n. 5, p. 554–560, dez. 2018.

- QIN, X. et al. Changes in yield and agronomic traits of soybean cultivars released in China in the last 60 years. **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 11, p. 973, 2017.
- RAJKUMAR; SINGH, D.; MURLIDHARAN, P. Lodging in soybean (*Glycine max*) as influenced by growth habit and other traits. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 84, n. 7, p. 896–898, 2014.
- RAZA, M. A. et al. Growth and development of soybean under changing light environments in relay intercropping system. **PeerJ**, v. 7, p. e7262, 23 jul. 2019.
- ROGERS, J. et al. Agronomic performance and genetic progress of selected historical soybean varieties in the southern USA. **Plant Breeding**, v. 134, n. 1, p. 85–93, fev. 2015.
- SAITOH, K.; NISHIMURA, K.; KITAHARA, T. Effect of lodging on seed yield of field-grown soybean. **Japanese Journal of Crop Science**, v. 81, p. 27–32, 1 jan. 2012.
- SHAPIRO, C.; FLOWERDAY, A. Effect of simulated lodging on soybean yield. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 158, p. 8–16, 1987.
- SPADER, V.; DESCHAMPS, C. Grain yield of soybean cultivars using different densities and sowing dates in a high-altitude region of south Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 3Sup11, p. 1823, 2 jul. 2015.
- SPECHT, J. E. et al. Soybean. In: **Yield Gains in Major U.S. Field Crops**. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2015. p. 311–355.
- SUHRE, J. J. et al. Soybean yield partitioning changes revealed by genetic gain and seeding rate interactions. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 5, p. 1631–1642, 2014.
- TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2016.
- TODESCHINI, M. et al. Soybean genetic progress in South Brazil: physiological, phenological and agronomic traits. **Euphytica**, v. 215, p. 215:124, 1 jul. 2019.
- UMBURANAS, R. C. et al. Soybean yield in different sowing dates and seeding rates in a subtropical environment. **International Journal of Plant Production**, v. 13, n. 2, p. 117–128, 2019.

UMBURANAS, R. C. **How breeding of Brazilian soybean cultivars modified morphophysiological attributes of plants?** tese (Doutorado em Fitotecnia)—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 14 ago. 2019.

USDA. **United States Department of Agriculture.** Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/downloads>>. Acesso em: 3 jul. 2020.

USTUN, A.; ALLEN, F. L.; ENGLISH, B. C. Genetic Progress in Soybean of the U.S. Midsouth. **Crop Science**, v. 41, n. 4, p. 993–998, 2001.

VOLDENG, H. D. et al. Fifty-Eight Years of Genetic Improvement of Short-Season Soybean Cultivars in Canada. **Crop Science**, v. 37, n. 2, p. crops1997.0011183X003700020020x, 1997.

WANG, C. et al. Seventy-five years of improvement of yield and agronomic traits of soybean cultivars released in the yellow-huai-hai river valley. **Crop Science**, v. 56, n. 5, p. 2354–2364, set. 2016.

WEBER, C. R.; FEHR, W. R. Seed yield losses from lodging and combine harvesting in soybeans. **Agronomy Journal**, v. 58, n. 3, p. 287–289, 1966.

WEN, B. et al. Slight shading stress at seedling stage does not reduce lignin biosynthesis or affect lodging resistance of soybean stems. **Agronomy**, v. 10, n. 4, p. 544, 9 abr. 2020.

WILCOX, J. R. **Soybeans: Improvement, Production, and Uses.** 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1987.

WILSON, E. W. et al. Genetic gain × management interactions in soybean: ii. nitrogen utilization. **Crop Science**, v. 54, n. 1, p. 340–348, jan. 2014.

WOODS, S. J.; SWEARINGIN, M. L. Influence of simulated early lodging upon soybean seed yield and its components. **Agronomy Journal**, v. 69, n. 2, p. 239–242, 1977.

WU, T. et al. Characterizing changes from a century of genetic improvement of soybean cultivars in northeast china. **Crop Science**, v. 55, n. 5, p. 2056–2067, set. 2015.

YANG, F. et al. Growth of soybean seedlings in relay strip intercropping systems in relation to light quantity and red:far-red ratio. **Field Crops Research**, v. 155, p. 245–253, jan. 2014.

ZHANG, R. et al. Internode elongation pattern, internode diameter and hormone changes in soybean (*Glycine max*) under different shading conditions. **Crop and Pasture Science**, v. 71, n. 7, p. 679, 2020.