

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARCIO ANDREI CAPELIN

**AMBIENTE DE CULTIVO, COMPOSIÇÃO QUÍMICA, POTENCIAL FISIOLÓGICO E
ARMAZENAMENTO DE SEMENTES DE SOJA**

PATO BRANCO

2022

MARCIO ANDREI CAPELIN

**AMBIENTE DE CULTIVO, COMPOSIÇÃO QUÍMICA, POTENCIAL FISIOLÓGICO E
ARMAZENAMENTO DE SEMENTES DE SOJA**

**Growing environment, chemical composition, physiological potential and
storage of soybean seeds**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Giovani Benin.

PATO BRANCO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento do trabalho, mesmo para fins comerciais, sem a possibilidade de alterá-lo, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco



MARCIO ANDREI CAPELIN

**AMBIENTE DE CULTIVO, COMPOSIÇÃO QUÍMICA, POTENCIAL FISIOLÓGICO E ARMAZENAMENTO DE
SEMENTES DE SOJA**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Produção Vegetal.

Data de aprovação: 08 de Dezembro de 2021

Prof Giovani Benin, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Adriana Paula D Agostini Contreiras Rodrigues, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Daniel Dias Rosa, Doutorado - Syngenta Seeds

Prof Gilvani Matei, Doutorado - Syngenta Seeds

Prof Ivandro Bertan, Doutorado - Syngenta Seeds

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 08/12/2021.

PATO BRANCO

2022

À minha família, e a minha esposa Pamela Tais
Clein Capelin, que sempre me apoiaram para que eu
obtivesse esse título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo Dom da vida e a proteção que tem me garantido;

Agradeço aos meus antepassados por juntos trilharem os caminhos difíceis do momento em que enfrentaram a abertura do desenvolvimento;

Agradeço a Pamela Tais Clein Capelin, minha esposa, pelo apoio incondicional;

À minha família, em especial, aos meus pais Mauri Capelin e Margarete Fátima Momoli Capelin, os quais foram batalhadores e guerreiros em lutar pela minha caminhada estudantil e agora pós-graduado, o meu muito obrigado; e junto a eles, agradeço ao meu irmão Mateus Andriu Capelin e aos meus sobrinhos afilhados Miguel Friedrichs Capelin e Manuela Friedrichs. Agradeço a minha tia, Prof^a. Dr^a. Marlene Capelin pelo imenso apoio durante meus estudos;

Ao meu orientador Dr. Giovani Benin imensa gratidão, que durante toda a minha graduação e a pós-graduação, mais de onze anos contribuiu para minha formação, foi compreensivo e apoiador para que eu enfrentasse as dificuldades. Agradeço à professora Dr^a. Adriana Paula D'Agostini Contreiras Rodrigues pelo suporte e direcionamentos no planejamento e na execução da Tese; junto a eles estendo os cumprimentos aos demais professores da UTFPR – *Campus Pato Branco/PR*, PPGAG;

Agradeço aos colegas de pós-graduação, em especial, a Laura Alexandra Madella, Maiara Cecilia Panho, Daniela Meira e Fabiana Barrinouvevo, pelo imenso suporte e dedicação durante a execução da pesquisa.

A multinacional Syngenta Seeds pela oportunidade de estudo e desenvolvimento pessoal e profissional, em especial, aos colegas Gilvani Matei, Rodrigo Risello, Rafael Fiabane, Doglas Martins Gluszcrak e Marcos Henrique Battistussi pelo apoio e companheirismo no desenvolvimento do trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para que eu pudesse alcançar essa conquista.

Muito Obrigado!

O seu talento faz você vencer obstáculos e seguir rápido, mas só vamos longe e vencemos os grandes desafios com humildade e cooperação em equipe.

RESUMO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill), commodity de maior importância econômica no mundo, apresenta variações no conteúdo de óleo e proteína. Essas variações podem ocorrer devido ao genótipo, ao ambiente e a interação genótipo x ambiente (G x E). Em áreas tropicais e subtropicais, a variabilidade das condições climáticas contribui para mudanças bioquímicas e alterações no poder germinativo, que podem ser influenciadas durante o armazenamento. Desta forma, o objetivo deste estudo foi determinar ambientes para a maximização da produção de óleo e proteína, e identificar cultivares de soja com elevado potencial de rendimento de sementes, óleo e proteína, em ambientes de alta e baixa altitude, e a interação destes fatores com o potencial fisiológico, condição e tempo de armazenamento de sementes de soja. Foram avaliadas 28 cultivares de soja em ambientes de alta (846 - 963 m, clima Cfb) e baixa (336 - 480 m, clima Cfa) altitude, para rendimento de sementes, peso de mil sementes, conteúdo de óleo e proteína, e rendimento de óleo e proteína, germinação, vigor, índice de velocidade de emergência, condição e tempo de armazenamento. Os resultados evidenciam que o ambiente de cultivo implica diretamente sobre a composição química das sementes de soja. A altitude exerce efeito positivo sobre o conteúdo de proteína, e negativo sobre o conteúdo de óleo. Foram identificadas cultivares com maior potencial de produção de óleo e proteína (kg ha^{-1}) em ambientes de alta e baixa altitude. É possível incrementar a produtividade de óleo e/ou proteína através da escolha de cultivares mais adaptadas a ambientes de alta e baixa altitude. Sementes com maior concentração de proteína apresentam potencial fisiológico superior, e o teor de óleo foi negativamente associado com o potencial fisiológico. O conteúdo do ácido graxo saturado palmítico correlacionou positivamente com o potencial fisiológico das sementes. Ambientes de elevada altitude maximizam a qualidade fisiológica das sementes independente da safra avaliada e da condição de armazenamento. Ao longo do tempo de armazenamento, as sementes armazenadas em barracão apresentaram maior decréscimo na qualidade fisiológica em relação a câmara fria. O teor de óleo não apresentou padrão de comportamento nos diferentes anos, locais e condições de armazenamento. O teor de proteína não é influenciado pelo armazenamento.

Palavras-chave: *Glycine max*; interação genótipo x ambiente; qualidade de sementes; composição química.

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill), the most economically important commodity in the world, presents variations in oil and protein content. These variations may occur due to genotype, environment and genotype x environment interaction (G x E). In tropical and subtropical areas, the variability of climatic conditions contributes to biochemical changes and changes in germination power, which can be influenced during storage. Thus, the objective of this study was to determine environments for the maximization of oil and protein production, and to identify soybean cultivars with high potential for grain, oil and protein yield, in high and low altitude environments, and the interaction of these factors with the physiological potential, condition and storage time of soybean seeds. Twenty-eight soybean cultivars were evaluated in high (846 - 963 m, Cfb climate) and low (336 - 480 m, Cfa climate) altitude environments for grain yield, thousand seeds weight, oil and protein content, and yield of oil and protein germination, vigor, emergence speed index, storage condition and time. The results showed that the cultivation environment directly affects the chemical composition of soybeans. Altitude has a positive effect on protein content and a negative effect on oil content. Cultivars with higher oil and protein production potential (kg ha^{-1}) were identified in high and low altitude environments. It is possible to increase oil and/or protein productivity by choosing cultivars more adapted to high and low altitude environments. Seeds with higher protein concentration have higher physiological potential and oil content was negatively associated with physiological potential. The content of palmitic saturated fatty acid correlated positively with the physiological potential of the seeds. High altitude environments maximize the physiological quality of seeds regardless of the evaluated crop and storage condition. Over the storage time, the seeds stored in a shed showed a greater decrease in physiological quality compared to the cold room. The oil content did not show a pattern of behavior in different years, locations and storage conditions. Protein content is not influenced by storage.

Keywords: *Glycine max*; genotype x environment interaction; seed quality; chemical composition.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Média e estabilidade para germinação (G) em ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; para envelhecimento acelerado (EA) em ambiente de alta (c) e baixa (d) altitude; e índice de velocidade de emergência (IVE) em ambiente de alta (e) e baixa (f) altitude, para 28 cultivares de soja avaliadas. PC componente principal, SVP: decomposição de valor singular	35
Figura 2 - Média e estabilidade para teor de óleo (OIL) para ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; e para teor de proteína (PROT) em ambiente de alta (c) e baixa (d) altitude para 28 cultivares de soja avaliadas	36
Figura 3 - Média e estabilidade para ácido palmítico (16:0) em ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; para esteárico (18:0) em ambiente de alta (c) e baixa (d); para ácido linolênico (18:3) em ambiente de alta (e) e baixa (f) altitude para 28 cultivares de soja avaliadas	39
Figura 4 - Média e estabilidade para o aminoácido aspártico (ASP) em ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; e para o aminoácido glutâmico (GLU) em ambiente de alta (c) e baixa (d) altitude para 28 cultivares de soja avaliadas ...	40
Figura 5 - Correlação de Pearson entre a altitude do ambiente de cultivo, caracteres fisiológicos e composição química da semente de cultivares de soja. GER: germinação; EA: envelhecimento acelerado; IVE: índice de velocidade de emergência; PROT: conteúdo de proteína; OIL: conteúdo de óleo; 16:0: ácido palmítico; 18:0: ácido esteárico; 18:1: ácido oleico; 18:2: ácido linoleico; 18:3: ácido linolênico; ASP: ácido aspártico; GLU: ácido glutâmico	44
Figura 6 - Dados meteorológicos de temperatura média do ar e precipitação diária durante a safra de soja 2017/2018 em a) ambientes de alta e b) baixa altitude, e durante a safra 2018/19 em c) ambientes de alta e d) baixa altitude.	51
Figura 7 - Média e estabilidade para rendimento de sementes (RG) em kg ha ⁻¹ para ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; e para peso de mil sementes (PMS) em g, em ambiente de alta (c) e baixa (d) altitude para 28 cultivares de soja avaliadas	53
Figura 8 - Média e estabilidade para rendimento de óleo (OILY) kg ha ⁻¹ , para ambiente de (A) alta e (B) baixa altitude, e rendimento de proteína (PROTY) em kg ha ⁻¹ , em ambiente de (C) alta e (D) baixa altitude de 28 cultivares de sojas avaliadas	55
Figura 9 - Média e estabilidade para conteúdo de óleo (OIL) em g kg ⁻¹ , para ambiente de (A) alta e (B) baixa altitude, e conteúdo de proteína (PROT) em g kg ⁻¹ , em ambiente de (C) alta e (D) baixa altitude de 28 cultivares de soja avaliadas	57
Figura 10 - Associação entre caracteres e cultivares em ambiente de a) alta e b) baixa, c) associação entre caracteres e locais de condução, e d) efeito da altitude sobre o conteúdo de óleo e proteína de sementes da soja. Caracteres: RG: rendimento de sementes em kg ha ⁻¹ ; PMS: Peso de mil sementes em g, OIL: conteúdo de óleo; PROT: conteúdo de proteína em g kg ⁻¹ ; OILY: rendimento de óleo; PROTY: rendimento de proteína em kg ha ⁻¹	60
Figura 11 - Temperatura média diária (°C) e umidade relativa (%) durante os 180 dias de armazenamento das sementes em barracão, para as safras 2017/18 A) e 2018/19 B).....	67

Figura 12 - Germinação (%) das sementes ao longo do tempo de armazenamento (0, 60, 120 e 180 dias), nas safras 2017/18 A, C) e 2018/19 B, D), em condições de barracão A, B) e câmara fria C, D)	71
Figura 13 - Médias de envelhecimento acelerado das sementes ao longo do tempo de armazenamento (0, 60, 120 e 180 dias), nas safras 2017/18 A, C) e 2018/19 B, D), em condições de barracão A, B) e câmara fria C, D)	72
Figura 14 - Médias de conteúdo de óleo das sementes ao longo do tempo de armazenamento (0, 60, 120 e 180 dias), nas safras 2017/18 A, C) e 2018/19 B, D), em condições de barracão A, B) e câmara fria C, D)	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cultivares, ano de lançamento, grupo de maturidade (GM), tecnologia e empresa obtentora das cultivares de soja avaliadas nas safras 2017/2018 e 2018/2019	29
Tabela 2 - Cultivares, ano de lançamento, grupo de maturidade (GM), tecnologia e empresa obtentora das cultivares de soja avaliadas nas safras 2017/2018 e 2018/2019	30
Tabela 3 - Parâmetros genéticos e média para germinação (GER, %), envelhecimento acelerado (EA, %), índice de velocidade de emergência (IVE), conteúdo de óleo (OIL, %), conteúdo de proteína (PROT, %), ácido palmítico (16:0, %), ácido esteárico (18:0, %), ácido oleico (18:1, %), ácido linoleico (18:2, %), ácido linolênico (18:3, %), ácido aspártico (ASP, %), ácido glutâmico (GLU, %).....	33
Tabela 4 - Médias para germinação (GER, %), envelhecimento acelerado (EA, %), índice de velocidade de emergência (IVE), conteúdo de óleo (OIL) e proteína (PROT) em 28 cultivares de soja avaliadas em alta e baixa altitude....	34
Tabela 5 - Médias para perfil de ácidos graxos - ácido palmítico (16:0), ácido esteárico (18:0), oléico (18:1), linoleico (18:2), linolênico (18:3) - e aminoácidos - ácido aspártico (ASP) e glutâmico (GLU) - em 28 cultivares de soja avaliadas em alta e baixa altitude	38
Tabela 6 - Valores mínimos, máximos e médias observadas nos ambientes de alta e baixa altitude para rendimento de grãos (RG) kg ha ⁻¹ , peso de mil sementes (PMS) em g, conteúdo de óleo (OIL) em g kg ⁻¹ , e conteúdo de proteína (PROT) em g kg ⁻¹ , rendimento de óleo (OILY) em kg ha ⁻¹ e rendimento de proteína (PROTY) em kg ha ⁻¹ , para 28 cultivares de soja conduzidas nas safras 2017/18 e 2018/19	52
Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) para os caracteres germinação (GER), envelhecimento acelerado (EA), conteúdo de óleo (OLEO) e conteúdo de proteína (PRO) de 28 cultivares, produzidas em Abelardo Luz - SC, Campos Novos - SC, Guarapuava - PR, Medianeira - PR, Palotina - PR e Realeza - PR, armazenadas em duas condições (barracão e câmara fria), durante 0, 60, 120 e 180 dias	68
Tabela 8 - Equações, coeficientes de variação (R ²), % dia ⁻¹ e % Total, da figura de regressão de germinação, envelhecimento acelerado, conteúdo de óleo e de proteína das sementes	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Alt	Altitude
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EUA	Estados Unidos da América
Long	Longitude
OCDE/FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
PR	Paraná
USDA	United States Department of Agriculture

LISTA DE SÍMBOLOS

ANOVA	Análise de variância
ASP	Aspártico
BAR	Barracão
C	Celsius
CF	Câmara fria
EA	Envelhecimento acelerado
G	Genótipo
GER	Germinação
GLU	Glutâmico
g	Gramas
°	Graus
ha	Hectares
IVE	Índice de velocidade de emergência
GE	Interação genótipo x ambiente
Kg	Kilogramas
m ²	Metro quadrado
m	Metros
ml	Mililitro
mm	Milímetros
ns	Não significativo
NIR	Near Infrared Reflectance spectroscopy
OIL	Óleo
PMS	Peso de mil sementes
%	Porcentagem
PROT	Proteína
RAS	Regras de análise de sementes
RG	Rendimento de sementes
OILY	Rendimento de óleo
PROTY	Rendimento de proteína
T	Temperatura
UR	Umidade Relativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	Importância econômica da cultura da soja	16
2.2	Importância e variabilidade da concentração do teor de óleo, proteína e ácidos graxos da semente.....	17
2.2.1	Óleo e Proteína	18
2.2.2	Ácidos graxos	19
2.3	Relação entre os teores de óleo e proteína e ácidos graxos na semente da soja.....	21
2.4	Efeito de locais de cultivo sobre óleo, proteína e ácidos graxos	22
2.5	Influência do armazenamento no potencial fisiológico das sementes de soja.....	24
3	QUALIDADE FISIOLÓGICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS SEMENTES DE SOJA, SOB DIFERENTES AMBIENTES DE PRODUÇÃO.....	27
3.1	Introdução.....	27
3.2	Material e métodos.....	29
3.2.1	Material vegetal e delineamento experimental	29
3.2.2	Colheita, secagem e padronização das amostras	30
3.2.3	Caracteres avaliados.....	31
3.2.4	Análises estatísticas	32
3.3	Resultados e discussões.....	33
3.4	Conclusões	46
4	TEORES DE ÓLEO, PROTEÍNA E PRODUTIVIDADE DE SOJA EM FUNÇÃO ALTITUDE E REGIÃO DE CULTIVO	47
4.1	Introdução.....	47
4.2	Material e métodos.....	48
4.2.1	Material vegetal e condução de experimentos no campo.....	48
4.2.2	Caracteres avaliados.....	49
4.2.3	Análises estatísticas	50
4.3	Resultados e discussões.....	50
4.4	Conclusões	61
5	LOCAIS DE CULTIVO, CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO, E TEMPO DE ARMAZENAMENTO SOBRE O POTENCIAL FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE SOJA.....	63

5.1	Introdução	63
5.2	Material e métodos	64
5.2.1	Colheita, secagem e padronização das amostras	65
5.2.2	Caracteres avaliados	65
5.2.3	Análises estatísticas	66
5.3	Resultados e Discussões	66
5.4	Conclusões	75
6	CONCLUSÕES GERAIS	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO GERAL

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é considerada a commodity de maior importância econômica no mundo. É um componente chave da segurança alimentar global como fonte de proteínas para alimentação humana, animal e biocombustível. Atualmente, a produção mundial ultrapassa 365 milhões de toneladas (USDA, 2021). Contudo, com o desafio de não aumentar áreas cultiváveis, associada a uma população crescente de 9,7 bilhões de pessoas até o ano 2050, faz com que haja uma pressão para o aumento da produtividade média por unidade de área, o que diminuirá a lacuna entre o rendimento médio e o rendimento potencial (VAN ITTERSUM *et al.*, 2013).

A seleção para maior produtividade e característica de interesse para o ser humano está levando as grandes culturas como a soja a perderem uma capacidade evolutiva muito importante, que é a de se auto multiplicarem no ambiente sem a interferência humana. Um exemplo disso é a ausência de deiscência de vagens e a rápida perda da capacidade de germinação das sementes quando expostas a ambientes de maior temperatura e/ou umidade.

Desta forma, explorar fatores que afetam o desenvolvimento e a produção da cultura da soja se faz necessário. Um fator importante para a soja é a qualidade de sementes. Esta, que é definida pelos parâmetros genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários. Estes parâmetros, determinam o estabelecimento adequado das plantas no campo e, sob condições ambientais satisfatórias promovem rendimentos elevados. Segundo Cantarelli *et al.* (2015), a qualidade de sementes é fundamental para a obtenção de plantas mais vigorosas e uniformes, para que possam atingir a produtividade desejada. Dentre os componentes que determinam a qualidade das sementes, o potencial fisiológico é o que apresenta a maior importância, garantindo estande de plantas adequado resultando em elevadas produtividades (CANTARELLI *et al.*, 2015; EMER *et al.*, 2015).

A qualidade das sementes pode ser influenciada por diversos fatores do ambiente, que ocorrem antes, durante e após a colheita, ou até mesmo por fatores intrínsecos às sementes. Os teores de proteína bruta e o de lipídios (óleo), constituintes da semente de soja, estão associados à sua qualidade fisiológica (ZIMMER, 2012; DELARMELINO-FERRARESI *et al.*, 2014). A composição do óleo de

soja, por sua vez, é influenciada pela interação genótipo x ambiente (MEDIC *et al.*, 2014; HEMINGWAY; ESKANDARI; RAJCAN, 2015).

O Brasil, apresenta grande variabilidade de condições ambientais, influenciando no comportamento da cultura da soja, e conseqüentemente, afetando a quantidade e a qualidade das sementes colhidas. Latitude, longitude, altitude e temperatura são os principais fatores que influenciam na produção de sementes de soja (SHARMA *et al.*, 2013; ALSAJRI *et al.*, 2020; NAKAGAWA *et al.*, 2020). Tanto o início dos processos depreciativos das sementes, quanto o grau de atuação de cada um dos fatores, estão ligados às características do material que lhes conferem propriedades específicas, variando desde à sua constituição química ao arranjo celular das sementes (MUIR, 2000; LORINI *et al.*, 2002).

O ambiente possui grande influência sobre a formação dos constituintes da semente, dentre os elementos climáticos, a temperatura é um dos mais importantes fatores que interferem na composição química das sementes (PÍPOLO; SINCLAIR; CAMARA, 2004), e está extremamente relacionada a altitude do ambiente de cultivo. De modo geral, locais de maior altitude possuem temperaturas mais amenas comparativamente a locais de menor altitude. Isso ocorre, devido ao gradiente adiabático do ar seco, que ocasiona diminuição da temperatura com a elevação da altitude. A proporção temperatura/altitude é de aproximadamente $1^{\circ}\text{C } 100 \text{ m}^{-1}$ (FRITZSONS; MANTOVANI; AGUIAR, 2008).

De modo geral, na medida em que a temperatura média aumenta, a quantidade de óleo também aumenta, enquanto a proteína diminui (GUNASEKERA *et al.*, 2006; NAEVE; HUERD, 2008). Essas alterações também podem ocorrer para os ácidos graxos. Sob altas temperaturas, as sementes apresentam maior quantidade de ácidos graxos saturados, no entanto, em temperaturas mais baixas, há um aumento no conteúdo de ácidos graxos não saturados (WILCOX; CAVINS, 1995; CARRERA *et al.*, 2011).

Além das condições ambientais de produção, o armazenamento também pode influenciar na qualidade fisiológica das sementes, podendo retardar, ou antecipar processos deteriorativos da semente, dependendo da condição a qual é submetida. A armazenagem quando conduzida de forma inadequada, pode comprometer a qualidade fisiológica das sementes, pois a exposição da semente a umidade e temperatura elevadas, acelera os processos fisiológicos da semente,

acarretando perda de vigor e de germinação (EIRAS; BIAGIONNI, 2014; FURQUIM *et al.*, 2014; RATHINAVEL, 2014).

Nesse sentido, objetivo deste estudo foi determinar ambientes para a maximização da produção de óleo e proteína, e identificar cultivares de soja com elevado potencial de rendimento de sementes, óleo e proteína em ambientes de alta e baixa altitude. Quantificar o efeito de ambientes de cultivo, com diferentes altitudes, sobre a composição química (óleo, proteína e ácidos graxos) e potencial fisiológico de sementes de soja. Quantificar o potencial fisiológico de sementes de soja em diferentes condições e tempo de armazenamento em sementes oriundas de diferentes altitudes de cultivo, e composição química contrastantes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância econômica da cultura da soja

A cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] tem grande importância na agricultura mundial, em termos de produção e área cultivada. É considerada a oleaginosa de maior importância para o agronegócio em diversos países, podendo ser cultivada nas mais variadas localizações geográficas e sob diferentes condições climáticas. Na última safra (2020/2021), o Brasil atingiu 144 milhões de toneladas, produzidas em 40 milhões de hectares, com uma produtividade média de 3560 kg ha⁻¹ (USDA, 2021).

A soja contribuiu decisivamente para a sustentabilidade da economia e da atividade agrícola no Brasil (CARVALHO *et al.*, 2013). A principal utilização da soja, tanto no Brasil, quanto no resto do mundo, é como matéria prima para a indústria de esmagamento, que produz óleo e farelo (PÍPOLO *et al.*, 2015). O farelo, rico em proteína, é utilizado principalmente na indústria de rações para aves, suínos e bovinos, sendo esse o principal emprego econômico da soja. O óleo, por sua vez, é utilizado pela indústria para produção de óleo refinado, gorduras hidrogenadas, margarinas, maionese, dentre outros produtos (MANDARINO; ROESSING, 2001). Entre as principais commodities, a soja ocupa o primeiro lugar na produção de óleo vegetal no mundo (FARHOOSH *et al.*, 2009).

Diversos produtos industriais são fabricados a partir da soja, como tintas, lubrificantes, solventes, plásticos e resinas (ERHAN, 2005). Além disso, tem sido a principal matéria prima para produção de biodiesel no Brasil e nos EUA (BIODIESEL, 2015). Na indústria de biodiesel, a composição ideal do óleo é atribuída a presença elevada de ácidos graxos monoinsaturados (Oleico), presença reduzida de ácidos graxos poli-insaturados (Linoleico e Linolênico) e controlado conteúdo de ácidos saturados (Esteárico e Palmítico). Esse balanço entre esses ácidos graxos influencia na qualidade e no rendimento do biodiesel (KNOTHE, 2010).

O aumento da competitividade da soja brasileira é de grande importância para o agronegócio nacional e mundial. Lavouras estabelecidas com sementes de alto vigor e germinação tendem a ter melhores rendimentos. Kolchinski *et al.* (2005) e Scheeren *et al.* (2010), observaram que sementes de alto vigor resultaram em produtividade aproximadamente 9% superiores aos lotes com sementes de baixo vigor. Por esta

razão, a qualidade das sementes é de vital importância para o estabelecimento ideal de uma lavoura.

2.2 Importância e variabilidade da concentração do teor de óleo, proteína e ácidos graxos da semente

A soja tem um alto valor nutricional e funcional, é a principal fonte vegetal de proteína e óleo. Essa leguminosa merece atenção devido ao seu alto teor de óleo e proteína (SONG *et al.*, 2013; MEDIC *et al.*, 2014), contém 37-42% de proteína e 17-24% de óleo (IQBAL *et al.*, 2015; PATIL *et al.*, 2017).

Sendo assim, a qualidade dos produtos alimentares de soja depende diretamente da alta quantidade de proteína nas sementes (STANOJEVIC *et al.*, 2011). Nesse sentido, o aumento do teor de proteína nas sementes é essencial para a comercialização, uma vez que se tem recompensa pelo teor de proteína na farinha de soja. No mercado internacional, são comercializadas diferentes categorias de farelo de soja, alta proteína (Hi-Pro), baixa proteína (Low-Pro). O farelo de soja com alto teor proteico dos EUA, Argentina, Brasil e União Europeia, contém 48,6; 46,8 e 48,9% de proteína, respectivamente, sendo que, o incremento no teor de proteína gera prêmios nas bolsas de valores (MOURYA *et al.*, 2016; PATIL *et al.*, 2017). O conteúdo da proteína na farinha de soja depende do seu nível nas sementes. Além disso, os genótipos de soja com alto teor de proteína também são preferidos para o processamento de alimentos nos países pobres do Sudeste Asiático (HOSOI *et al.*, 2008).

Nos últimos 60 anos houve uma diminuição no conteúdo de proteína da soja (MAHMOUD *et al.*, 2016). Já o teor de óleo, tem sido incrementado em genótipos modernos e mais produtivos, pois esse caractere apresenta correlação positiva com produtividade de sementes (KIM *et al.*, 2016; FINOTO *et al.*, 2017). Variações no conteúdo de proteína em soja vem sendo atribuído ao melhoramento genético, pois nos últimos anos tem sido desenvolvido cultivares com o objetivo de aumentar a produtividade, entretanto, a melhoria no rendimento não foi acompanhada pelo aumento no conteúdo de proteína. Aparentemente, há uma relação inversa entre essas duas características. Aumentar o teor de proteína em soja é difícil devido à sua forte correlação negativa com o conteúdo de óleo (CHAUDHARY *et al.*, 2015) e rendimento de sementes (BANDILLO *et al.*, 2015; KIM *et al.*, 2016).

Outro fator observado por programas de melhoramento genético que tem gerado esforços para melhorar a sua composição, são os ácidos graxos no óleo, que além de trazerem vantagens competitivas para a soja, podem expandir a sua aplicação na indústria alimentícia e de biodiesel (WILSON, 2014). A semente de soja em sua composição contém na base seca cerca de 120 a 130 g kg⁻¹ de ácido palmítico, 30 a 40 g kg⁻¹ de ácido oleico, 480 a 580 g de ácido linoleico kg⁻¹ e 50 a 80 g kg⁻¹ de ácido linolênico na composição de óleo total (BELLALLOUI *et al.*, 2015).

Para produzir biocombustíveis muitas das características relacionadas à composição de ácidos graxos são relevantes. Um dos principais objetivos dos programas de melhoramento é alterar a composição do óleo de soja, reduzindo ácidos graxos linoleico e linolênico e aumentando os ácidos graxos oleico, esteárico e palmítico. Estas modificações aumentam a qualidade e a estabilidade do óleo de soja (SNYDER *et al.*, 1990; OLIVA *et al.*, 2006). No entanto, a modificação dessas características pode estar afetando positivamente ou negativamente na vida útil das sementes, justificando o estudo destes fatores.

2.2.1 Óleo e Proteína

Os teores de óleo e de proteína sofreram alterações consideráveis ao longo dos anos, e tem sido relatado em estudos realizados em todo o mundo (WILCOX *et al.*, 1998; BONATO *et al.*, 2000; MORRISON *et al.*, 2000; YAKLICH *et al.*, 2002; WILSON, 2004; OLIVEIRA, 2007; MORRISON *et al.*, 2008; ALBRECHT *et al.*, 2008; MINUZZI *et al.*, 2009; SEDIYAMA, 2009; ROWNTREE *et al.*, 2013; BRUNO *et al.*, 2015; FELIPE *et al.*, 2016; MAHMOUD *et al.*, 2016). Sedyama (2009) verificou que o percentual de óleo na semente de soja é em torno de 20%, podendo ocorrer variações de 13 a 28%. Morrison *et al.* (2000) utilizando cultivares representativas de sete décadas de melhoramento, observaram aumento significativo nos teores de óleo e diminuição nos teores de proteína. Em estudo mais recente, Morrison *et al.* (2008) relataram que a concentração de óleo aumentou 0,24% ao ano⁻¹, enquanto a concentração de proteína reduziu 0,15% ao ano⁻¹, considerando um período de 58 anos de melhoramento genético.

Rowntree *et al.* (2013) avaliando genótipos disponibilizados para cultivo entre os anos de 1923 a 2008, observaram decréscimo linear no teor de proteína com o passar dos anos entre 0,19 e 0,24 g kg⁻¹ ao ano⁻¹, variando em função do grupo de maturação estudado. Já para a concentração de óleo, foi observado incremento

variando entre 0,12 e 0,14 g kg⁻¹ ao ano⁻¹. Em um estudo recente realizado na Argentina, Felipe *et al.* (2016) também observaram decréscimo nos teores de proteína na soja.

Nos Estados Unidos (EUA), cultivares plantadas na região norte, entre 1949 e 1998 também apresentavam teor médio de proteína de 40,7%, e na região sul de 41,1% (YAKLICH *et al.*, 2002). Mahmoud *et al.* (2016) apresentaram evidências de redução no teor de proteína das cultivares de soja lançadas no EUA entre 1940 e 2005. Segundo os autores, é atribuída a correlação negativa entre proteína e produtividade. A concentração de proteína de 11.726 acessos de soja, da coleção de germoplasma do USDA variou de 34,1% a 54,8%, com média de 42,1% (WILSON, 2004). Oliveira (2007), reuniu informações sobre 15.558 acessos de soja do germoplasma mantido pelo USDA tendo encontrado variação entre 31,7% e 57,9%, nos teores de proteína, e entre 8,1% e 25,4% nos teores de óleo.

No Brasil, o teor de proteína encontrado em cultivares de soja é em torno de 40%, porém, este valor pode variar dependendo da região. A média das variedades lançadas no Rio Grande do Sul entre 1970 e 1980, era de 40,7%, e entre 1991 e 1996, de 39% (BONATO *et al.*, 2000). Albrecht *et al.* (2008) verificaram teores de proteína variando entre 35,5% a 43,2% em cultivares do Paraná. Minuzzi *et al.* (2009) verificaram teores de proteína variando entre 31% e 35% no Mato Grosso do Sul. Trabalhos realizados por Bruno *et al.* (2015) com duas cultivares de soja (BRS 184 e BRS 282) apresentaram teor de óleo de 16,61% e 15,52%, respectivamente. Isso demonstra a existência de ampla variabilidade para esses caracteres.

2.2.2 Ácidos graxos

A soja contém cerca de 20% de lipídeos sendo a maior parte composta por triacilgliceróis. A composição e a distribuição dos ácidos graxos na molécula dos triacilgliceróis é o que determina a qualidade do óleo (ZAMBIAZI; PRZYBYLSKI; MENDONÇA, 2007). Na soja, os ácidos graxos insaturados correspondem aproximadamente a 86% do total, e o ácido linoleico encontra-se em maior concentração, sendo que uma cultivar “típica” é composta por cinco principais ácidos graxos: palmítico (C16:0), esteárico (C18:0), oleico (C18:1), linoleico (C18:2) e linolênico (C18:3) (8-17, 3-4, 25, 52 e 8%, respectivamente) (FERRARI; OLIEVIRA; SCABIO, 2005; FEHR, 2007; MEDIC *et al.*, 2014).

Devido à alta proporção de gorduras poli-insaturadas, que são oxidativamente instáveis, a maioria dos óleos de soja são quimicamente hidrogenados, a fim de aumentar a estabilidade e a validade. Infelizmente, o processo de hidrogenação produz gorduras trans, que têm sido associadas ao aumento do risco de doenças cardíacas e elevados níveis de lipoproteína de baixa densidade (LDL) no soro sanguíneo (HUNTER; ZHANG; KRIS-ETHERTON, 2009).

As variações nos teores dos ácidos graxos podem afetar o equilíbrio e a qualidade do óleo. Os ácidos palmítico e esteárico são saturados e o oleico monoinsaturado, estes são mais estáveis ao processo de oxidação (CHOWDHURY *et al.*, 2014; HU; WIATRAK, 2012). Os ácidos graxos linoleico e linolênico são poli-insaturados, podem trazer benefícios para a saúde humana, no entanto eles são suscetíveis ao processo de oxidação, o que afeta negativamente a estabilidade e o sabor do óleo (SANTOS *et al.*, 2013; SARKAR *et al.*, 2015). Oliveira *et al.* (2010) encontrou em acessos do departamento dos EUA (USDA) valores de ácido esteárico variando de 1,1% e 10,6%, de ácido palmítico (C16:0) entre 8,0% e 18,4%, de ácido oleico (C18: 1) entre 11,1% e 50,3%, de ácido linoleico (C18: 2) entre 30,3% e 65,0% e de ácido linolênico (C18:3) entre 3,4% a 18,1%.

A busca pelo equilíbrio e maior qualidade do óleo fez com que empresas buscassem alterar os teores de ácidos graxos na soja, e em 2010, o USDA aprovou para cultivo à soja Plenish™ High Oleic, da empresa DuPont. O genótipo apresenta teores de ácido oleico acima de 75% e teores de ácidos graxos saturados abaixo de 20% (WILSON, 2014). A Bayer/Monsanto também já desenvolveu algo semelhante, a soja Vistive-Gold™, que apresenta baixos de teores de ácido palmítico (3%) e poli-insaturados, e altos teores de ácido oleico (68% a 74%) (WILSON, 2014).

Além da da soja Plenish® High Oleic e Vistive® Gold que são transgênicas, uma empresa chamada Calyxt, desenvolveu por meio de edição gênica a soja Calyno™ High Oleic Soybean Oil. Calyno™ contém aproximadamente 80% de ácido oleico e até 20% menos de ácidos graxos saturados em comparação com o óleo de soja comum, bem como zero grama de gordura trans. Um dos benefícios em potencial de sustentabilidade do óleo Calyno é que ele tem até três vezes a vida útil e prolongada em comparação com os óleos básicos, fornecendo um produto mais sustentável (CALYXT, 2021).

2.3 Relação entre os teores de óleo e proteína e ácidos graxos na semente da soja

Apesar de ganhos genéticos constantes obtidos no rendimento de sementes através de estratégias de melhoramento genético, os mecanismos moleculares e fisiológicos que controlam o rendimento, as proteínas e o teor de óleo ainda não são amplamente conhecidos (PATIL *et al.*, 2017). Observa-se na composição química das sementes de soja, associação negativa entre os teores de óleo e proteína (AKOND *et al.*, 2012; POPOVIC *et al.*, 2012), e, frequentemente, entre o teor de proteína e a produtividade de sementes. Por outro lado, a relação entre o teor de óleo e a produtividade é positiva, o que torna possível manter a produtividade quando se pratica a seleção para alto teor de óleo (FINOTO *et al.*, 2017). O aumento no potencial produtivo ou no teor de óleo pode causar redução no teor de proteína, o que também traz dificuldades ao melhoramento.

A síntese de proteína e outros compostos como amido e lipídeos competem por fotossintetizados durante o período de enchimento de sementes e, quando a necessidade de nitrogênio para o rendimento é satisfeita, o mesmo é usado para aumentar a concentração de proteína. Dessa forma, quando falta nitrogênio, os fotossintetizados que seriam convertidos em proteínas são usados na síntese de lipídeos e outros compostos (NAOE; PELUZIO; SOUSA, 2017). Esse processo competitivo pode ser um dos fatores que explicariam a correlação alta e negativa entre proteína e óleo nas sementes de soja.

Em relação aos ácidos graxos, Bachlava *et al.* (2008), observaram na cultura da soja, associações negativas entre: teor de ácido oleico/produtividade, ácido oleico/linoleico, ácido oleico/linolênico e ácido oleico/palmítico. A associação negativa entre os teores de ácido oleico e linoleico também foi encontrada por Alt *et al.* (2005).

Outros estudos relataram uma correlação negativa entre ácido oleico e linolênico, que podem ser explicados pelo fluxo da biossíntese de ácidos graxos (CLEMENTE; CAHOON, 2009). Essa correlação negativa foi confirmada por respostas indiretas a seleção recorrente em massa para aumento do conteúdo de ácido oleico (CLEMENTE; CAHOON, 2009). Alt *et al.* (2005) verificou para cultura da soja, correlação negativa de ácido oleico com palmítico (-0,47), esteárico (-0,38), linoleico (-0,97), e linolênico (-0,45).

Farno (2005) estudando populações de soja, encontrou correlações negativas entre Linoleico/Esteárico, Linoleico/Oleico e Linolênico/Oleico e uma correlação

positiva entre Oleico/Estearico, que se repetiram em dois anos de avaliações. Já as correlações negativas encontradas entre Oleico/Rendimento, Linolênico/Linoleico, Oleico/Palmítico e Linolênico/Palmítico não se repetiram nos dois anos de avaliação. Correlações negativas entre Linoleico/Oleico e Linolênico/Oleico são esperadas porque o ácido Oleico é um precursor de Linoleico e Linolênico e o ácido Linoleico é precursor do Linolênico (CARVER *et al.*, 1984; FARNO, 2005).

2.4 Efeito de locais de cultivo sobre óleo, proteína e ácidos graxos

De acordo com Delarmelino-Ferraresi *et al.* (2014), os teores de proteína e óleo afetam a qualidade fisiológica de sementes de soja, isso torna importante para o conhecimento das alterações na qualidade química da semente provocada pelo ambiente. Por se tratar de caracteres quantitativos, os teores de óleo e de proteína têm controle genético complexo (MARQUEZ, 2010). No entanto, a composição química, representada principalmente pelos teores de óleo e de proteína nas sementes de soja, podem variar em função do ambiente, do genótipo e da interação desses fatores. Embora a genética geralmente seja considerada categórica na composição química, as variáveis meteorológicas também podem influenciar na concentração de óleo e de proteína das sementes (ROTUNDO; WESTGATE, 2009; VEIGA *et al.*, 2010; MARQUEZ, 2010, NAOE; PELUZIO; SOUSA, 2017).

Dentre os elementos climáticos, a temperatura é um dos fatores que mais interfere na composição química das sementes (PÍPOLO; SINCLAIR; CAMARA, 2004). Variações ambientais que ocorram em qualquer uma das etapas de formação da semente podem impedir que a proteína seja corretamente formada, interrompendo o processo e favorecendo a síntese de óleo e outros compostos. De modo geral, o déficit hídrico associado às altas temperaturas favorece a síntese de óleo em detrimento à proteína nas sementes de soja (NAOE *et al.*, 2017).

Outro fato que pode estar relacionado ao aumento do conteúdo de proteína nas sementes de soja, em condições de temperatura mais elevada, na ausência de estresse hídrico, é o aumento na taxa de assimilação de nitrogênio nessas condições. Com o óleo acontece o inverso, pois são mais dependentes de fotoassimilados, afetados negativamente pelo aumento da temperatura (ROTUNDO; WESTGATE, 2009). Temperaturas amenas durante o desenvolvimento inicial da planta é inversamente correlacionado ao teor de óleo em fases mais avançadas de

desenvolvimento da semente, e altas temperaturas comprometem a fertilidade do pólen reduzindo o rendimento de sementes (DJANAGUIRAMAN *et al.*, 2013).

Vários relatos demonstram que o teor de proteína tende a ser negativamente correlacionado com concentração de óleo, e positivamente associado com a temperatura, implicando em um desvio preferencial de carbono para a formação de proteína ou do óleo, dependendo da temperatura e da disponibilidade hídrica. Piper e Boote (1999), testaram intervalos mais amplos de temperaturas, onde houve aumento no teor de óleo com o aumento da temperatura até um ponto máximo atingido, seguido por um declínio constante no teor de óleo em altas temperaturas, indicando um efeito não linear da temperatura do ar com o conteúdo de óleo em espécies, como a soja. Contrastantemente, girassol (*Helianthus annuus*), safira (*Carthamus tinctorius*) e mamona (*Ricinus communis*) pareceram mais tolerantes a mudanças de temperatura em geral no que diz respeito ao teor de óleo de sementes, embora os níveis de proteína mostrem, no entanto, uma ótima resposta ao aumento da temperatura (DJANAGUIRAMAN *et al.*, 2013).

Além da temperatura, o encurtamento do comprimento do dia pode aumentar a concentração de proteína, aumentando a taxa de translocação de nitrogênio para a semente e a taxa de crescimento da semente (GIBSON; MULLEN, 1996). Gonçalves *et al.* (2007) verificou que quando a temperatura aumenta e se aproxima de 30 °C, o acúmulo de proteína total na semente é afetado, possivelmente favorecendo o metabolismo no sentido de biossíntese. Wilson (2004) relata que plantas sob altas temperaturas e estresse hídrico concentram mais óleo e menos proteína na semente, pelo fato de que as temperaturas mais altas geralmente estarem relacionadas a redução de disponibilidade de água na planta.

Em relação a composição química do óleo, formada pelos ácidos graxos, estes também sofrem mudanças com diferentes tipos de clima, solo, estação de desenvolvimento, cultivares, maturidade e saúde da planta, fatores microbiológicos e variação genética da planta (WILCOX; CAVINS, 1995; GUNSTONE, 2005; HAMMOND *et al.*, 2005). Hou *et al.* (2006) evidenciaram que a temperatura é o fator ambiental predominante na constituição dos ácidos graxos, sendo o ácido linoleico o mais vulnerável às mudanças ambientais. Esses mesmos autores observaram efeito significativo na interação genótipos com ambientes, para os ácidos graxos palmítico, esteárico, oleico, linoleico e linolênico. Lannal *et al.* (2005), relataram o aumento nos

teores de ácidos graxos poli-insaturados e a redução do teor de ácido oleico, sob baixas temperaturas.

Em várias espécies de plantas há relatos de uma relação inversa entre a temperatura e os ácidos graxos poli-insaturados, sendo que temperaturas mais baixas determinam o aumento na proporção de ácidos graxos monoinsaturados e poli-insaturados (ROLLETSCHEK *et al.*, 2007). Resposta semelhante foi encontrada no conteúdo de ácidos graxos poli-insaturados de *B. napus*, *Helianthus annuus*, *Linum usitatissimum*, o nível de insaturação de ácidos graxos foi geralmente inversamente correlacionado com a temperatura de crescimento. Em temperaturas mais altas durante o desenvolvimento de sementes, produziu níveis menores de ácido Linoleico e Linolênico e as reduções nesses ácidos graxos poliinsaturados foram compensadas pelo aumento no teor de ácidos graxos monoinsaturados C18:1 (Oleico) (SINGER *et al.*, 2016).

O teor elevado de ácidos graxos insaturados e o teor relativamente elevado de ácido linolênico torna o óleo de soja muito suscetível às reações de oxidação, o que pode afetar positivamente o processo de deterioração das sementes. Portanto, sementes de soja de diferentes cultivares e diferentes lotes da mesma cultivar podem variar quanto à composição química, devido ao cultivo em diferentes condições ambientais, com potenciais reflexos sobre a qualidade fisiológica. Assim, a composição química da semente pode influenciar qualitativamente e quantitativamente na disponibilidade de compostos passíveis de pronta utilização pelo embrião e afetar o processo germinativo de sementes (FERRAREZI *et al.*, 2014).

2.5 Influência do armazenamento no potencial fisiológico das sementes de soja

Para a produção de sementes é de fundamental importância um manejo adequado desde a semeadura até o armazenamento (MOREANO *et al.*, 2013). Levando em conta um complexo produtivo de sementes de alta qualidade, as condições e o período de armazenagem são os dois principais fatores influentes sobre o ponto final da cadeia produtiva de sementes. Para a soja, comumente, o armazenamento ideal preza inicialmente por sementes de boa qualidade inicial, devido ao potencial de armazenamento estar diretamente ligado a essa questão.

As condições de temperatura e umidade relativa, segundo uma série de autores, são determinantes para manutenção da qualidade de sementes, pois alterações químicas e biológicas na semente armazenada podem ocorrer em virtude

da interação contínua desses fatores, sendo ainda, o tempo um potencializador do possível evento (JYOTI; MALIK, 2013; KANDIL *et al.*, 2013; PEREIRA *et al.*, 2013).

Segundo Coradi *et al.* (2015), o resfriamento artificial do ambiente de armazenamento para temperaturas menores que 10 °C preservam a qualidade das sementes. Alencar *et al.* (2009), afirmam que em temperaturas de 40 °C, apenas sementes com teor de umidade até 11% podem ser armazenados por um período de 180 dias, sem perder a qualidade. Além disso, de acordo com Marcos Filho (2009), o teor de óleo nas sementes também tem grande influência sobre a sua qualidade, visto que durante o armazenamento sofre peroxidação, gerando hidroperóxidos, e radicais livres. Portanto, as interações desses fatores juntamente com o período de armazenamento podem contribuir para a menor vida útil da semente, comprometendo a sua qualidade fisiológica.

A deterioração das sementes manifesta-se no decorrer do tempo, ocasionando reflexos negativos no vigor (FINOTO *et al.*, 2017). Quando armazenada, a massa de sementes pode ser considerada como um sistema ecológico, que apesar dos processos deteriorativos serem inevitáveis, sua intensidade pode ser controlada. Normalmente, a detecção dos processos deteriorativos ocorre durante o armazenamento, devido à interação entre variáveis físicas, químicas (teor de proteína, óleo e seus componentes os ácidos graxos) e biológicas (intrínsecas e extrínsecas) serem facilitadas e intensificadas. No entanto, o índice deteriorativo depende da taxa de variação desses fatores, os quais são afetados diretamente pela temperatura, umidade relativa e o teor de água do material e, ainda, pela inter-relação desses com a semente e com a estrutura de armazenagem (SINHA; MUIR, 1973; CARDOSO; BINOTTI; CARDOSO, 2012).

O óleo de soja por ser um dos principais componentes da semente, tem grande influência sob a sua vida útil, visto que sofre autooxidação durante o armazenamento. A oxidação do óleo é influenciada interativamente pela composição de ácidos graxos, luz, temperatura, dentre outros (CHOE; MIN, 2006). A interação dentre esses fatores juntamente com o período de armazenamento e temperatura podem contribuir para o retardamento da vida útil da semente.

Neste contexto, a exposição das sementes às condições de temperatura e umidade elevada acelera o processo de deterioração, provocando alterações degenerativas em seu metabolismo (EMER *et al.*, 2015). Portanto, sabendo da importância de uma semente de soja perante seu sistema de produção,

principalmente devido ao seu elevado custo/benefício, estudos envolvendo a qualidade de sementes e sua relação com fatores que possivelmente afetam seu potencial de desempenho, como a armazenagem, tornam-se indispensáveis.

3 QUALIDADE FISIOLÓGICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS SEMENTES DE SOJA, SOB DIFERENTES AMBIENTES DE PRODUÇÃO

3.1 Introdução

Devido aos elevados teores de óleo e proteína, a soja é matéria prima de diversos produtos destinados à alimentação humana e animal, produção de biocombustíveis, lubrificantes, entre outros. A produção mundial foi de 365 milhões de toneladas, na safra 2020/2021. No Brasil, a produção estimada foi de 136 milhões de toneladas, sendo o maior produtor e exportador da semente (USDA, 2021). Além da expansão da área cultivada, a produtividade da cultura no Brasil também tem aumentado consideravelmente ao longo dos anos, passando de 1748 kg ha⁻¹ na safra 1976/1977 para 3379 kg ha⁻¹ na safra 2019/2020 (CONAB, 2021). O incremento de produtividade é resultado de esforços de programas de melhoramento genético, manejo da cultura, combinado ao uso de sementes de elevado potencial fisiológico (EBONE *et al.*, 2020; BAGATELI *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

O estabelecimento de plantas a nível de campo é a primeira etapa crítica para a produção de sementes (FINCH-SAVAGE; BASSEL, 2016), sendo diretamente influenciada pela qualidade fisiológica das sementes. Sementes de elevada qualidade influenciam diretamente no desenvolvimento inicial de plantas e componentes do rendimento. A qualidade fisiológica é definida pela capacidade de desempenhar funções vitais, como germinação, vigor e longevidade, fundamentais para assegurar o sucesso da produção (WIMALASEKERA, 2015; EBONE *et al.*, 2020).

Em relação ao crescimento de plântulas, Feliceti *et al.* (2020) observaram que a qualidade fisiológica impacta significativamente no comprimento da parte aérea, sendo superior em plântulas provenientes de sementes de alto vigor. Bagateli *et al.* (2020) constataram redução no número de vagens em plantas de soja provenientes de sementes de baixo vigor. Ebone *et al.* (2020) verificaram que plântulas provenientes de sementes de baixo vigor apresentaram atraso na emergência, resultando em plantas com menor número de vagens devido a menor área foliar, menor acúmulo de fotoassimilados ao longo do ciclo, e, conseqüentemente, menor produtividade.

A qualidade de um lote de sementes depende diretamente das condições ambientais em que a planta-mãe e a semente são expostas durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura (LAMICHANEY; MAITY, 2021). Em áreas tropicais e

subtropicais, observadas no Brasil, a variabilidade das condições climáticas dificulta a produção de sementes de qualidade. Nesse sentido, a escolha de locais para produção de sementes é de extrema importância. Locais que apresentam temperaturas amenas e clima seco nas fases de maturação e colheita favorecem a produção de sementes de elevada qualidade. Essas condições não são facilmente encontradas em regiões tropicais, mas podem ocorrer em altitudes acima de 700 m (RAO; DULLOO; ENGELS, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2021). Por outro lado, elevadas temperaturas durante o processo de desenvolvimento das sementes, resultam em redução da qualidade fisiológica (REN; BILYEU; BEUSELINCK, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

O ambiente de produção também afeta a composição química das sementes (SILVA *et al.*, 2017; ASSEFA *et al.*, 2018). De modo geral, sementes produzidas em ambientes com temperaturas médias mais amenas apresentam incrementos nos teores de proteína, e sementes produzidas em ambientes com temperaturas médias mais elevadas apresentam maior concentração de óleo (ALSAJRI *et al.*, 2020; NAKAGAWA *et al.*, 2020). A concentração de óleo e de proteína estão diretamente relacionados ao potencial fisiológico das sementes. Bellaloui *et al.* (2017a) observaram que cultivares com maiores teores de proteína apresentam elevadas taxas de germinação, enquanto cultivares com maior teor de óleo apresentam, comparativamente, menores índices de germinação.

A proteína serve como fonte de energia para o embrião, auxiliando no estabelecimento e no desenvolvimento das plantas no campo (WEI *et al.*, 2020). O óleo, por outro lado, é armazenado em corpos lipídicos como triacilglicerol e serve como fonte primária de carbono e os carboidratos pré-formados na semente servem como substrato da respiração durante o período pré-germinativo (WENDT *et al.*, 2017). Todavia, durante esse processo ocorrem reações oxidativas de degradação dos lipídios, produzindo radicais livres e peróxidos de hidrogênio, que podem danificar a estrutura celular, e, conseqüentemente, prejudicar o processo de germinação (BELTRÃO; OLIVEIRA, 2007).

Além do teor de óleo e de proteínas, os ácidos graxos também exercem influência sobre o potencial fisiológico das sementes. O ambiente de cultivo influencia diretamente na composição dos ácidos graxos, sendo a temperatura o principal fator (ALSAJRI *et al.*, 2020). Bellaloui *et al.* (2017a) observaram relação entre o ambiente de cultivo, composição de ácidos graxos e a qualidade fisiológica de sementes, com

associações positivas entre germinação x ácido palmítico, e negativas entre germinação e ácido linoleico e linolênico. Segundo Woyann *et al.* (2019), o melhoramento genético tem contribuído para redução dos ácidos graxos linoleico e linolênico e o aumento de oleico, esteárico e palmítico, visando maior qualidade e estabilidade do óleo de soja, o que pode estar contribuído positivamente na qualidade fisiológica de sementes.

Em vista desse contexto, objetivou-se, neste estudo, quantificar o efeito de ambientes de cultivo, com diferentes altitudes, sobre a composição química (óleo, proteína e ácidos graxos) e o potencial fisiológico de sementes de soja.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Material vegetal e delineamento experimental

Foram avaliadas 28 cultivares de soja representativas de diferentes programas de melhoramento, recentemente disponibilizadas para cultivo na região Sul do Brasil (Tabela 1). As cultivares usadas para realização do experimento foram adquiridas de empresas de produção de sementes com germinação e vigor acima de 85%.

Tabela 1 - Cultivares, ano de lançamento, grupo de maturidade (GM), tecnologia e empresa obtentora das cultivares de soja avaliadas nas safras 2017/2018 e 2018/2019

(continua)

Código	Cultivar	Ano de lançamento	GM	Tecnologia	Empresa obtentora
1	AS 3610 IPRO	2014	6.6	RR2BT	Bayer
2	AS 3730 IPRO	2014	7.3	RR2BT	Bayer
3	5855RSF IPRO	2016	5.5	RR2BT	GDM
4	63164RSF IPRO	2018	6.3	RR2BT	GDM
5	68170RSF IPRO	2016	6.8	RR2BT	GDM
6	58160RSF IPRO	2018	5.8	RR2BT	GDM
7	7166RSF IPRO	2015	6.8	RR2BT	GDM
8	50152RSF IPRO	2018	5.0	RR2BT	GDM
9	5958RSF IPRO	2015	5.8	RR2BT	GDM
10	M5705 IPRO	2015	5.7	RR2BT	Bayer
11	M5730 IPRO	2016	5.7	RR2BT	Bayer
12	M5838 IPRO	2017	5.8	RR2BT	Bayer
13	M5917 IPRO	2014	5.9	RR2BT	Bayer
14	M5947 IPRO	2015	6.3	RR2BT	Bayer
15	M6210 IPRO	2013	6.6	RR2BT	Bayer
16	M6410 IPRO	2013	6.6	RR2BT	Bayer
17	NA 5909 RG	2012	6.2	RR1	Syngenta
18	NS 5445 IPRO	2013	5.5	RR2BT	Syngenta
19	NS 5959 IPRO	2013	5.9	RR2BT	Syngenta
20	NS 6006 IPRO	2016	5.7	RR2BT	Syngenta
21	NS 6601 IPRO	2018	6.6	RR2BT	Syngenta
22	NS 6828 IPRO	2017	6.4	RR2BT	Syngenta
23	NS 6906 IPRO	2016	6.4	RR2BT	Syngenta

Tabela 2 - Cultivares, ano de lançamento, grupo de maturidade (GM), tecnologia e empresa obtentora das cultivares de soja avaliadas nas safras 2017/2018 e 2018/2019

(conclusão)					
Código	Cultivar	Ano de lançamento	GM	Tecnologia	Empresa obtentora
24	NS 6909 IPRO	2013	6.2	RR2BT	Syngenta
25	NS 7300 IPRO	2014	7.3	RR2BT	Syngenta
26	NS 7709 IPRO	2018	7.4	RR2BT	Syngenta
27	95R51 RR	2013	5.3	RR1	Corteva
28	TMG 7062 IPRO	2016	6.5	RR2BT	TMG

Fonte: Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (2021)

O delineamento experimental utilizado foi de blocos completamente casualizados, com três repetições. As unidades experimentais foram constituídas por quatro linhas de 5 m de comprimento, espaçadas por 0,5 m entre linha, totalizando 10 m² e com densidade de 34 sementes m². O manejo de adubação, pragas, doenças e plantas daninhas foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura. Os experimentos no campo foram conduzidos nas safras de 2017/2018 e 2018/2019 em diferentes ambientes, classificados como alta (846 a 963 metros) e baixa (336 a 480 metros) altitude (Tabela 2). Os locais de alta altitude são classificados como Cfb (clima subtropical úmido com verão quente), enquanto os de baixa altitude pertencem a classificação Cfa (clima subtropical úmido com verão temperado), conforme classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013).

Tabela 2 - Ambiente, locais de condução, região edafoclimática de cultivo da soja (Rec), latitude (Lat), longitude (Long), altitude (Alt) e classificação climática dos experimentos nas safras 2017/2018 e 2018/2019

Ambiente	Local	Safr		Rec	Lat	Long	Alt (m)	Clima
		2017/18	2018/19					
Alta Altitude	Abelardo Luz – SC	x	x	102	26.53S	52.29W	846	Cfb
	Campos Novos – SC	x		103	27.40S	51.23W	963	Cfb
	Guarapuava – PR	x	x	103	25.46S	51.67W	950	Cfb
Baixa Altitude	Medianeira – PR	x	x	201	25.26S	54.08W	414	Cfa
	Palotina – PR	x		201	24.34S	53.83W	336	Cfa
	Realeza – PR	x	x	102	25.77S	53.53W	480	Cfa

Nota: Cfa: Clima subtropical úmido, sem estação seca, com verão quente; Cfb: Clima subtropical úmido, sem estação seca, com verão temperado, de acordo com classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013).

Fonte: Alvares *et al.* (2013)

3.2.2 Colheita, secagem e padronização das amostras

No estágio de maturação (R8 – FEHR; CAVINESS, 1977), foi realizada a colheita das duas linhas centrais de cada parcela, totalizando uma área útil de 5 m². A umidade inicial das sementes variou de 15% a 22%. As amostras de cada unidade experimental foram armazenadas em embalagens de papel multifoliado, mantidas em secador de sementes a gás com ar aquecido a 35 °C até a padronização da umidade

(13%), e armazenadas em barracão (temperatura e umidade controlada), durante 180 dias.

3.2.3 Caracteres avaliados

A análise do potencial fisiológico das sementes foi realizada no Laboratório de Sementes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Pato Branco – PR. Para a avaliação do potencial fisiológico das sementes, foram utilizados os testes de germinação (GER), envelhecimento acelerado (EA) e índice de velocidade de emergência (IVE).

No teste de germinação (GER) foram separadas quatro sub-amostras contendo 50 sementes cada, as quais foram distribuídas uniformemente sob duas folhas de papel germitest, previamente umedecidas com água destilada 2,5 vezes a massa seca e cobertas com outra folha. Em seguida, as sementes foram envoltas no papel germitest, e os rolos foram acondicionados em germinador com temperatura de 25 °C e fotoperíodo de 12 horas, durante oito dias. A avaliação foi realizada no 8º dia, e a contagem de sementes germinadas foi de acordo com os critérios estabelecidos nas Regras de Análises de Sementes (RAS) sendo os resultados expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

Para o teste de envelhecimento acelerado (EA) foram utilizadas 200 sementes, e subdivididas em quatro subamostras de 50 sementes. Foram usadas caixas de poliestireno transparente com tampa (gerbox), contendo 40 ml de água destilada. Sobre os recipientes foi utilizada uma tela de 2 mm para a sustentação das sementes. As caixas foram mantidas à temperatura de 41 °C por 48 horas em câmara B.O.D. (KRZYZANOWSKI *et al.*, 1999). Após esse período, as sementes foram submetidas à germinação, seguindo o mesmo procedimento de GER (BRASIL, 2009).

A avaliação foi realizada no 5º dia, e a contagem de sementes germinadas foi de acordo com os critérios estabelecidos na RAS, sendo os resultados expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

No teste de índice de velocidade de emergência (IVE), 100 sementes foram divididas em quatro subamostras de 25 e semeadas em canteiro. A velocidade de emergência foi avaliada diariamente, até o oitavo dia após a semeadura. As sementes foram consideradas emergidas quando os cotilédones estavam acima da superfície do solo. O IVE foi estimado de acordo com equação proposta por Maguire (1962):

$$\text{IVE} = (N1/T1) + (N2/T2) \dots + (Nn/Tn) \quad (1)$$

Onde IVE é o índice de velocidade de emergência, adimensional; N1, N2, Nn são o número de plantas emergidas, na primeira, segunda e enésima contagem; T1, T2, Tn corresponde ao número de dias da semeadura à primeira, segunda e enésima contagem.

A concentração de óleo (OIL), proteína (PROT) e ácidos graxos foi avaliada utilizando espectrofotômetro - NIRs (Near Infrared Reflectance Spectroscopy), modelo NIR Perten® DA 7250. Os ácidos graxos avaliados foram saturados: ácido palmítico (16:0) e esteárico (18:0); monoinsaturado - oleico (18:1); e poliinsaturados: linoleico (18:2), linolênico (18:3). Além disso, foram determinadas as concentrações dos aminoácidos - aspártico (ASP) e glutâmico (GLU) - ambos expressos em percentagem em base seca.

3.2.4 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de homogeneidade, de variância (teste de Bartlett) e de normalidade de resíduos (Lilliefors). Atendido os pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) conjunta, em esquema bifatorial (Ambientes x Cultivares), considerando todos os fatores como fixos. Para os caracteres que apresentaram significância, foi realizada a análise de comparação de médias pelo teste de Scott Knott a nível de 5% de probabilidade de erro. A análise de dados foi realizada, utilizando o pacote “ExpDes.pt” (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2018) no software estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2020).

A análise de correlação de Pearson, nos ambiente de baixa e alta altitude foi realizada utilizando a função `corr_plot()` do pacote “metan” (OLIVOTO; LÚCIO, 2020). A análise gráfica de média e estabilidade foi realizada usando função `gge()` do pacote “metan” (OLIVOTO; LÚCIO, 2020) no software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2020). Os parâmetros usados foram: dados sem transformação (transformação = 0), escala de dados por desvio padrão (escala = 1, SD com escala), dados focados no genótipo mais interação genótipo x ambiente (G + GE) (centralização de dados = 2) e partição de valores singulares (SVP = 1, foco no genótipo).

3.3 Resultados e discussões

A análise da variância indicou significância para os efeitos simples de cultivar, ambiente e a interação cult*amb (Tabela 3). O efeito de cultivar foi significativo para a maioria dos caracteres, exceto para o ácido palmítico (18:0). Constatou-se efeito significativo de ambiente para germinação (GER), envelhecimento acelerado (EA), óleo (OIL), proteína (PROT), aspártico (ASP) e glutâmico (GLU). Interação significativa entre Cultivares x Ambiente foi observada para todos os caracteres avaliados. Isso aponta para o comportamento diferencial das cultivares, e que o ambiente de cultivo influenciou seus desempenhos. Ou seja, as condições ambientais dos locais de cultivo impactam a qualidade fisiológica de sementes de soja (FINCH-SAVAGE; BASSEL, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Os coeficientes de variação apresentaram-se entre 2,14 e 32,36%, indicando boa precisão experimental para a maioria dos caracteres. Os valores de herdabilidade foram relativamente elevados, com exceção de IVE e 18:0, indicando que a maior parte da variação fenotípica é de origem genética. A variância da interação genótipo x ambiente (σ_{ge}^2) apresentou significância para todos os caracteres avaliados.

Tabela 3 - Parâmetros genéticos e média para germinação (GER, %), envelhecimento acelerado (EA, %), índice de velocidade de emergência (IVE), conteúdo de óleo (OIL, %), conteúdo de proteína (PROT, %), ácido palmítico (16:0, %), ácido esteárico (18:0, %), ácido oleico (18:1, %), ácido linoleico (18:2, %), ácido linolênico (18:3, %), ácido aspártico (ASP, %), ácido glutâmico (GLU, %)

Parâmetro	GER	EA	IVE	OIL	PROT	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	ASP	GLU
h^2	0,710	0,74	0,260	0,86	0,76	0,72	0,36	0,79	0,65	0,76	0,80	0,73
σ_g^2	74,76**	65,7**	0,21 ^{ns}	0,38**	0,61**	0,03**	0,00 ^{ns}	1,98**	1,47**	0,22**	0,01**	0,02**
σ_{ge}^2	48,70**	34,0**	1,01**	0,11**	0,34**	0,02**	0,01**	0,86**	1,18**	0,11**	0,00**	0,01**
σ_e^2	132,70**	300,8**	0,21 ^{ns}	1,74**	1,73*	0,02 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,02**	0,09**
σ_{res}^2	231,25	221,72	3,83	0,29	0,75	0,12	0,07	2,87	6,02	0,50	0,01	0,03
Mean	59,96	46,02	8,41	21,92	37,42	10,92	3,72	21,57	55,65	7,38	4,45	6,73
CV (%)	25,36	32,36	23,27	2,47	2,32	3,16	6,88	7,85	4,41	9,53	2,14	2,57

Nota: **,*p<0.01 e p<0.05; σ_g^2 : variância genotípica; σ_{ge}^2 : variância da interação genótipo x ambiente; σ_e^2 : variância ambiental; σ_{res}^2 : variância residual; h^2 : herdabilidade; CV: coeficiente de variação.

Fonte: Autoria própria (2021)

De modo geral, sementes produzidas em ambientes de ALTA altitude, onde as temperaturas são mais amenas, possuem maiores percentuais de GER e EA (Tabela 4), quando comparados a ambientes de BAIXA altitude, com temperaturas médias mais elevadas. Resultados semelhantes foram observados por França-Neto *et al.* (2016) e Rao, Dulloo e Engels (2017).

Tabela 4 - Médias para germinação (GER, %), envelhecimento acelerado (EA, %), índice de velocidade de emergência (IVE), conteúdo de óleo (OIL) e proteína (PROT) em 28 cultivares de soja avaliadas em alta e baixa altitude

Cultivares	GER		EA		IVE		OIL		PROT	
	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa
AS 3610 IPRO	60 Ab	54 Ab	49 Ab	30 Bb	8,10 Ac	7,75 Ac	20,3 Bd	21,6 Ae	38,1 Ad	37,6 Aa
AS 3730 IPRO	64 Ab	49 Bc	50 Ab	25 Bc	8,61 Ac	9,01 Ab	20,4 Bd	21,9 Ae	40,7 Aa	38,1 Ba
5855RSF IPRO	79 Aa	65 Bb	68 Aa	35 Bb	9,79 Ab	7,07 Bd	20,4 Bd	22,2 Ae	39,7 Ab	38,1 Ba
63164RSF IPRO	82 Aa	50 Bc	75 Aa	26 Bc	10,25 Aa	7,90 Bc	20,6 Bc	22,9 Ad	38,9 Ac	36,8 Bb
68170RSF IPRO	58 Ab	27 Bd	46 Ab	11 Bd	7,30 Ad	6,88 Ad	21,7 Bb	23,1 Ac	38,5 Ac	35,8 Bc
58160RSF IPRO	81 Aa	79 Aa	74 Aa	59 Ba	9,52 Bb	10,97 Aa	20,5 Bd	21,9 Ae	38,6 Ac	36,8 Bb
7166RSF IPRO	67 Ab	35 Bd	51 Ab	16 Bd	9,07 Ab	6,72 Bd	22,1 Ba	24,0 Ab	36,5 Ae	34,5 Bd
50152RSF IPRO	61 Ab	47 Bc	59 Ab	29 Bb	7,68 Bd	10,29 Aa	21,7 Bb	24,5 Aa	38,9 Ac	35,2 Bd
5958RSF IPRO	69 Ab	61 Ab	61 Aa	34 Bb	7,61 Ad	8,37 Ab	21,4 Bb	23,0 Ac	39,0 Ac	37,2 Bb
M5705 IPRO	75 Aa	73 Aa	70 Aa	49 Ba	9,76 Ab	7,90 Bc	20,4 Bd	22,7 Ad	37,1 Ae	34,2 Bd
M5730 IPRO	79 Aa	71 Aa	67 Aa	53 Ba	10,62 Aa	9,07 Bb	20,7 Bc	22,4 Ad	38,8 Ac	36,4 Bb
M5838 IPRO	67 Ab	72 Aa	60 Aa	56 Aa	8,14 Ac	8,78 Ab	20,6 Bc	23,7 Ab	38,0 Ad	34,8 Bd
M5917 IPRO	82 Aa	71 Aa	66 Aa	47 Ba	10,70 Aa	7,45 Bc	20,5 Bd	23,1 Ac	39,3 Ab	35,8 Bc
M5947 IPRO	75 Aa	41 Bd	67 Aa	24 Bc	10,75 Aa	8,02 Bc	20,9 Bc	22,8 Ad	37,2 Ae	36,8 Ab
M6210 IPRO	54 Ab	39 Bd	51 Ab	22 Bc	8,44 Ac	7,67 Ac	21,6 Bb	23,8 Ab	38,1 Ad	36,2 Bc
M6410 IPRO	76 Aa	58 Bb	64 Aa	47 Ba	8,64 Ac	8,73 Ab	21,3 Bb	22,5 Ad	37,2 Ae	36,9 Ab
NA 5909 RG	75 Aa	55 Bb	60 Aa	31 Bb	8,81 Ac	7,99 Ac	22,3 Ba	23,9 Ab	37,5 Ad	35,9 Bc
NS 5445 IPRO	82 Aa	56 Bb	61 Aa	46 Ba	7,62 Ad	7,02 Ad	20,2 Bd	22,8 Ad	38,5 Ac	37,0 Bb
NS 5959 IPRO	63 Ab	40 Bd	54 Ab	37 Bb	6,83 Ad	6,84 Ad	21,8 Bb	23,5 Ac	37,3 Ae	36,0 Bc
NS 6006 IPRO	67 Ab	56 Ab	57 Ab	36 Bb	10,06 Aa	7,70 Bc	21,5 Bb	23,3 Ac	37,9 Ad	35,8 Bc
NS 6601 IPRO	73 Aa	33 Bd	58 Ab	26 Bc	9,01 Ab	7,27 Bc	21,2 Bb	22,1 Ae	38,7 Ac	37,6 Ba
NS 6828 IPRO	65 Ab	39 Bd	58 Ab	28 Bb	9,11 Ab	7,77 Bc	20,4 Bd	22,7 Ad	39,2 Ac	36,4 Bb
NS 6906 IPRO	66 Ab	59 Ab	61 Aa	30 Bb	9,65 Ab	8,63 Ab	20,7 Bc	22,5 Ad	39,0 Ac	37,6 Ba
NS 6909 IPRO	60 Ab	48 Bc	56 Ab	36 Bb	8,10 Ac	6,09 Bd	20,9 Bc	23,1 Ac	38,4 Ac	36,3 Bc
NS 7300 IPRO	60 Ab	41 Bd	49 Ab	25 Bc	9,94 Ab	6,10 Bd	20,2 Bd	21,7 Ae	39,6 Ab	37,0 Bb
NS 7709 IPRO	59 Ab	31 Bd	42 Ab	14 Bd	9,39 Ab	6,42 Bd	20,0 Bd	21,9 Ae	39,8 Ab	37,1 Bb
95R51 RR	60 Ab	40 Bd	56 Ab	23 Bc	6,36 Ad	6,97 Ad	22,1 Ba	23,7 Ab	37,9 Ad	36,7 Bb
TMG 7062 IPRO	65 Ab	47 Bc	55 Ab	37 Bb	10,77 Aa	8,67 Bb	21,0 Bc	22,8 Ad	37,0 Ae	35,5 Bc
Média	69	51	59	33	8,95	7,86	21,0	22,9	38,4	36,4

Nota: Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade de erro.

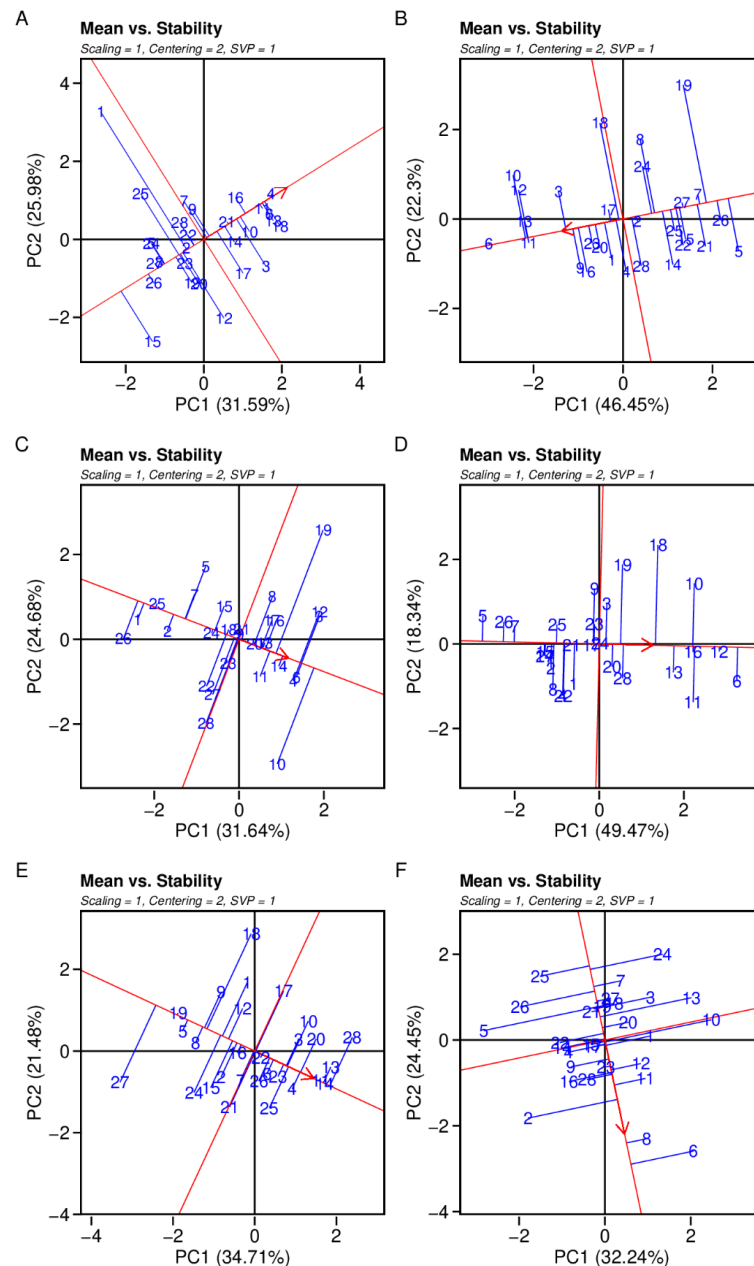
Fonte: Autoria Própria (2021)

As análises gráficas biplot, permitem avaliar os genótipos quanto ao desempenho produtivo (RG) e a estabilidade de forma conjunta. A interpretação do desempenho é simples, quanto maior a projeção (mais à direita) o genótipo estiver no sentido do eixo-x (seta única de cor vermelha), mais produtivo é o mesmo. A projeção do genótipo no sentido do eixo-y (seta azul com dupla indicação), indica a sua estabilidade. Quanto menor a projeção, ou seja, mais próximo do eixo-x, mais estável é o genótipo (YAN, 2014). Essas análises possibilitam identificar padrões de comportamento e facilitam a seleção de genótipos estáveis e adaptados a ambientes específicos (AZAM *et al.*, 2021; EVANGELISTA *et al.*, 2021).

Em ambos os ambientes (ALTA e BAIXA altitude), identificou-se cultivares com melhor desempenho médio para GER (ALTA: 63164RSF IPRO; NS 5445 IPRO; 5855RSF IPRO; 58160RSF IPRO; AS 3610 IPRO e M5730 IPRO; BAIXA: 58160RSF IPRO; M5730 IPRO; M5705 IPRO; M5838 IPRO e M5917 IPRO), EA: ALTA: M5705 IPRO; 58160RSF IPRO; 63164RSF IPRO; 5855RSF IPRO e M5838 IPRO; BAIXA:

58160RSF IPRO; M5838 IPRO, M5730 IPRO; M6410 IPRO; M5917 IPRO e NS 5445 IPRO, e IVE (ALTA: TMG 7062 IPRO; M5947 IPRO; M5917 IPRO e M5730 IPRO; BAIXA: 58160RSF IPRO, 50152RSF IPRO, AS 3730 IPRO e M5730 IPRO). As cultivares 58160RSF IPRO; M5705 IPRO; M5730 IPRO e M5838 IPRO apresentaram bom desempenho para GER, EA e IVE em ALTA, quanto e BAIXA altitude (Figura 1).

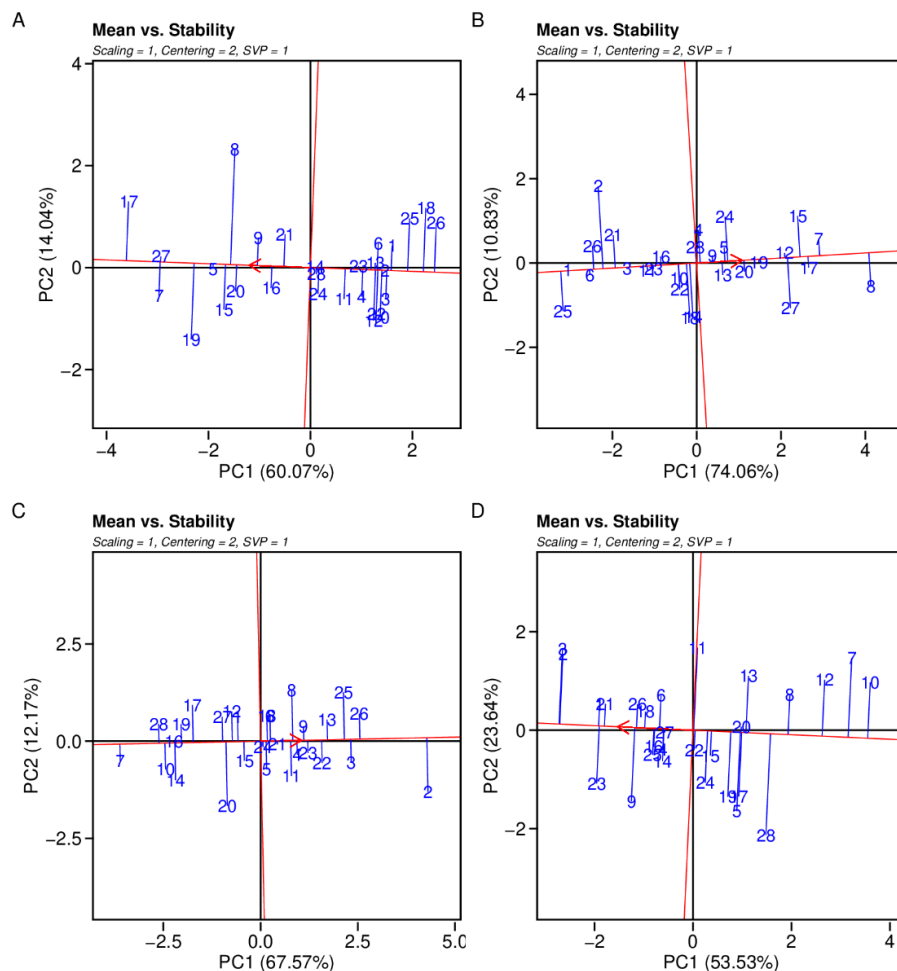
Figura 1 - Média e estabilidade para germinação (G) em ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; para envelhecimento acelerado (EA) em ambiente de alta (c) e baixa (d) altitude; e índice de velocidade de emergência (IVE) em ambiente de alta (e) e baixa (f) altitude, para 28 cultivares de soja avaliadas



**Nota: PC componente principal, SVP: decomposição de valor singular.
Fonte: Autoria própria (2021)**

Para concentração de óleo (OIL), identificou-se cultivares com melhor desempenho médio em ALTA altitude (NA 5909 RG; 7166RSF IPRO; 95R51 RR; NS5959 IPRO; 68170RSF IPRO; M6210 IPRO e 50I52RSF IPRO) e BAIXA altitude (50I52RSF IPRO; 7166RSF IPRO; NA 5909 RG; M6210 IPRO; 95R51 RR; M5838 IPRO e N 5959 IPRO). Dentre estas cultivares, destacam-se em ambos os ambientes, as cultivares NA 5909 RG; 7166RSF IPRO; 95R51 RR; 50I52RSF IPRO e NS 5959 IPRO (Figura 2 a, b).

Figura 2 - Média e estabilidade para teor de óleo (OIL) para ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; e para teor de proteína (PROT) em ambiente de alta (c) e baixa (d) altitude para 28 cultivares de soja avaliadas



**Nota: PC componente principal, SVP: decomposição de valor singular.
Fonte: Autoria própria (2021)**

Houve maior concentração de OIL no ambiente de BAIXA altitude (22,9%) em relação ALTA altitude (21,0%), sendo que todas as cultivares independentemente do grupo de maturação aumentaram a concentração de OIL no ambiente de baixa altitude. Além disso, a diferença média entre o ambiente de ALTA e BAIXA altitude para o teor de

óleo (OIL) foi de 1,9% (Tabela 4). Temperaturas mais altas durante a fase de enchimento de sementes podem acarretar maior acúmulo de óleo, fato ocorrido nos ambientes de BAIXA altitude. De acordo com Nakagawa *et al.* (2018), o aumento de óleo pode estar relacionado com a expressão positiva do gene Gm DREBL e GmWRI1-like1. Segundo esse mesmo autor, concomitante a isso, altas temperaturas reduzem a concentração de proteína devido a menor expressão dos genes Gm Gy1, Gm Gy2, Gm Gy4, Gm Gy5 e Gm β -conglucina, que codificam as principais proteínas. Isso pode explicar a associação negativa entre óleo e proteína (Figura 5).

Para a concentração de proteína (PROT) as cultivares com médias superiores em ambiente de ALTA altitude foram (AS 3730 IPRO; NS 7709 IPRO; 5855RSF IPRO; NS 7300 IPRO e NS 6828 IPRO) e BAIXA altitude (5855RSF IPRO; AS 3730 IPRO; NS 6906 IPRO; AS 3610 IPRO e NS 6601 IPRO). Dentre estas, destacam-se em ambos os ambientes, as cultivares AS 3730 IPRO e 5855RSF IPRO (Figura 2 c, d). Sendo que todas as cultivares independente do grupo de maturação aumentaram a concentração de PROT no ambiente de Alta altitude. O teor médio de proteína (PROT), no ambiente de ALTA e BAIXA altitude foram de 38,4% e 36,4%, respectivamente (Tabela 4).

De modo geral, observou-se que cultivares mais precoces apresentaram maior teor médio de óleo. Analisando as três cultivares mais precoces (50I52RSFIPRO, NS5445IPRO, 95R51RR) em comparação com as três mais tardias (AS3730IPRO, NS7300IPRO, NS7709IPRO) a diferença do percentual de óleo chegou a (1,49%). O inverso ocorre para teor de proteína, onde as cultivares de ciclo mais longo apresentaram maiores concentrações (1,4%). Isso pode ser explicado pela dinâmica de acúmulo desses componentes na semente. O acúmulo de óleo tem maior associação com a duração do enchimento de sementes, mais constante durante toda a fase de enchimento, diferente da proteína, que tem seu maior pico de acúmulo no fim do enchimento de sementes, tendo um menor período de deposição (POETA *et al.*, 2016; TAMAGNO *et al.*, 2020). Isso pode explicar por que cultivares com ciclo mais longo apresentam maiores concentrações de PROT.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados médios das cultivares nos ambientes de ALTA e BAIXA altitude para ácido palmítico (16:0), ácido esteárico (18:0), ácido oleico (18:1), ácido linoleico (18:2) e ácido linolênico (18:3).

Tabela 5 - Médias para perfil de ácidos graxos - ácido palmítico (16:0), ácido esteárico (18:0), oléico (18:1), linoleico (18:2), linolênico (18:3) - e aminoácidos - ácido aspártico (ASP) e glutâmico (GLU) - em 28 cultivares de soja avaliadas em alta e baixa altitude

Cultivares	16:0		18:0		18:1		18:2		18:3		ASP		GLU	
	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Baixa
AS3610 IPRO	11,7 Aa	11,1 Ba	3,8 Aa	3,7 Aa	18,2 Be	20,2 Ad	57,4 Ac	55,0 Ba	8,7 Aa	8,4 Aa	4,5 Ad	4,5Aa	6,9 Ad	6,8 Aa
AS 3730 IPRO	11,1 Ac	11,1 Aa	3,7 Aa	3,8 Aa	22,0 Ac	22,9 Ab	56,7 Ac	55,7 Aa	7,2 Ac	6,8 Ac	4,8 Aa	4,5Ba	7,4 Aa	6,8 Ba
5855RSF IPRO	11,2 Ab	11,1 Aa	3,8 Aa	3,9 Aa	22,6 Ac	21,4 Ac	55,5 Ad	54,0 Ab	7,7 Ab	7,6 Ab	4,7 Ab	4,5Ba	7,2 Ab	6,8 Ba
63164RSF IPRO	10,9 Ac	10,8 Ab	3,8 Aa	3,6 Bb	20,1 Ad	21,1 Ac	56,4 Ac	56,1 Aa	7,7 Ab	6,9 Bc	4,6 Ac	4,4Ba	7,0 Ac	6,6 Bb
68170RSF IPRO	11,0 Ac	10,7 Bb	3,6 Ab	3,7 Ab	21,1 Ad	19,7 Bd	57,0 Ac	56,6 Aa	7,8 Ab	8,1 Aa	4,5 Ac	4,3Bc	6,9 Ac	6,4 Bc
58160RSF IPRO	11,4 Ab	11,2 Aa	3,9 Aa	3,7 Aa	19,8 Bd	21,7 Ac	55,9 Ac	53,9 Bb	7,9 Ab	7,2 Bb	4,6 Ac	4,4Bb	7,0 Ac	6,6 Bb
7166RSF IPRO	11,2 Ab	10,7 Bb	3,5 Bb	3,8 Aa	18,3 Ae	19,5 Ad	60,7 Aa	57,2 Ba	7,3 Ac	7,6 Ab	4,3 Ae	4,1Bd	6,6 Ae	6,1 Bd
50152RSF IPRO	10,8 Ac	10,6 Ab	3,5 Bb	3,7 Aa	23,4 Bc	20,9 Ac	55,4 Bd	58,3 Aa	7,4 Ac	6,3 Bd	4,6 Ac	4,2Bd	7,1 Ac	6,3 Bc
5958RSF IPRO	10,4 Ad	10,4 Ac	3,6 Ab	3,6 Ab	24,9 Ab	22,9 Bb	55,0 Ad	54,7 Ab	6,8 Ad	6,3 Ad	4,6 Ac	4,4Bb	7,1 Ac	6,6 Bb
M5705 IPRO	11,3 Ab	10,9 Ba	3,9 Aa	3,8 Aa	19,9 Ad	20,0 Ad	57,2 Ac	55,1 Ba	8,4 Aa	8,2 Aa	4,4 Ae	4,1Bd	6,6 Ae	6,0 Bd
M5730 IPRO	10,9 Ac	11,0 Aa	3,7 Aa	3,7 Aa	21,9 Ac	21,4 Ac	53,4 Ae	55,1 Aa	8,1 Ab	7,0 Bc	4,6 Ac	4,3Bb	7,0 Ac	6,5 Bb
M5838 IPRO	10,9 Ac	10,9 Aa	3,9 Aa	3,7 Aa	22,4 Ac	20,0 Bd	56,0 Ac	56,5 Aa	8,1 Ab	6,9 Bc	4,5 Ad	4,1Bd	6,8 Ad	6,2 Bd
M5917 IPRO	11,1 Ab	11,3 Aa	3,9 Aa	3,8 Aa	22,5 Ac	20,7 Bc	53,8 Ae	55,1 Aa	8,8 Aa	7,3 Bb	4,7 Ab	4,3Bc	7,1 Ac	6,4 Bc
M5947 IPRO	11,0 Ac	10,5 Bc	3,8 Aa	3,9 Aa	20,1 Bd	22,8 Ab	56,2 Ac	53,3 Bb	8,2 Aa	7,0 Bc	4,4 Ae	4,4Ab	6,7 Ae	6,6 Ab
M6210 IPRO	10,9 Ac	10,8 Ab	3,5 Bb	3,7 Aa	20,2 Bd	22,3 Ab	57,5 Ac	56,5 Aa	7,7 Ab	6,4 Bd	4,6 Ac	4,4Bb	6,8 Ad	6,5 Bb
M6410 IPRO	11,3 Ab	10,8 Bb	3,8 Aa	3,9 Aa	18,0 Be	20,1 Ad	58,4 Ab	55,5 Ba	8,5 Aa	7,8 Ba	4,4 Ae	4,4Ab	6,6 Ae	6,6 Ab
NA 5909 RG	11,0 Ac	10,7 Bb	3,6 Ab	3,7 Aa	21,4 Ad	21,3 Ac	56,8 Ac	56,3 Aa	7,1 Ac	6,4 Bd	4,5 Ad	4,3Bc	6,8 Ae	6,4 Bc
NS 5445 IPRO	11,1 Ac	10,6 Bb	3,8 Aa	3,8 Aa	20,9 Bd	22,8 Ab	56,4 Ac	52,2 Bc	8,2 Ab	7,4 Bb	4,5 Ac	4,4Bb	6,9 Ad	6,6 Bb
NS 5959 IPRO	10,9 Ac	10,8 Ab	3,3 Bb	3,7 Aa	20,7 Ad	20,7 Ac	55,4 Ad	56,9 Aa	8,5 Aa	6,7 Bc	4,4 Ae	4,3Bc	6,8 Ae	6,5 Bb
NS 6006 IPRO	11,1 Ac	10,7 Bb	3,6 Ab	3,6 Ab	21,9 Ac	22,2 Ab	58,0 Ab	56,4 Aa	6,9 Ad	6,7 Ac	4,5 Ad	4,3Bc	6,9 Ad	6,4 Bc
NS 6601 IPRO	10,6 Ad	10,9 Aa	3,9 Aa	4,0 Aa	23,7 Ab	24,9 Aa	53,9 Ae	52,3 Ac	7,4 Ac	6,1 Bd	4,6 Ac	4,4Ba	6,9 Ad	6,7 Bb
NS 6828 IPRO	11,3 Ab	11,1 Aa	3,6 Ab	3,4 Bc	20,7 Ad	21,8 Ac	56,8 Ac	56,5 Aa	7,9 Ab	7,0 Bc	4,7 Ab	4,4Bb	7,1 Ac	6,5 Bb
NS 6906 IPRO	11,3 Ab	10,8 Bb	3,6 Bb	3,9 Aa	20,1 Ad	21,2 Ac	55,9 Ac	56,3 Aa	8,1 Ab	7,1 Bc	4,6 Ac	4,5Ba	7,1 Ac	6,7 Ba
NS 6909 IPRO	10,7 Ad	10,5 Ac	3,5 Bb	3,8 Aa	26,0 Aa	25,9 Aa	52,1 Ae	51,1 Ac	6,9 Ad	6,3 Bd	4,6 Ac	4,3Bb	7,0 Ac	6,5 Bb
NS 7300 IPRO	10,8 Ad	10,8 Ab	3,5 Bb	3,8 Aa	24,1 Ab	23,4 Ab	54,5 Ad	54,3 Ab	7,9 Ab	6,8 Bc	4,7 Ab	4,4Bb	7,2 Ab	6,6 Bb
NS 7709 IPRO	11,2 Ab	11,0 Aa	3,6 Bb	3,8 Aa	21,1 Ad	20,7 Ac	58,0 Ab	56,8 Aa	7,5 Ac	7,3 Ab	4,7 Ab	4,4Ba	7,2 Ab	6,7 Bb
95R51 RR	10,9 Ac	10,4 Bc	3,7 Ab	3,8 Aa	23,1 Ac	22,9 Ab	55,7 Ac	53,8 Ab	6,5 Ad	6,3 Ad	4,5 Ad	4,4Bb	6,9 Ad	6,6 Bb
TMG 7062 IPRO	11,0 Ac	10,6 Bb	3,9 Aa	3,7 Bb	22,2 Ac	21,1 Ac	53,0 Ae	56,0 Ba	7,8 Ab	6,6 Bc	4,4 Ae	4,2Bc	6,7 Ae	6,3 Bc
Média	11,0	10,8	3,7	3,8	21,5	21,7	56,0	55,3	7,7	7,0	4,5	4,3	6,9	6,5

Nota: Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autoria própria (2021)

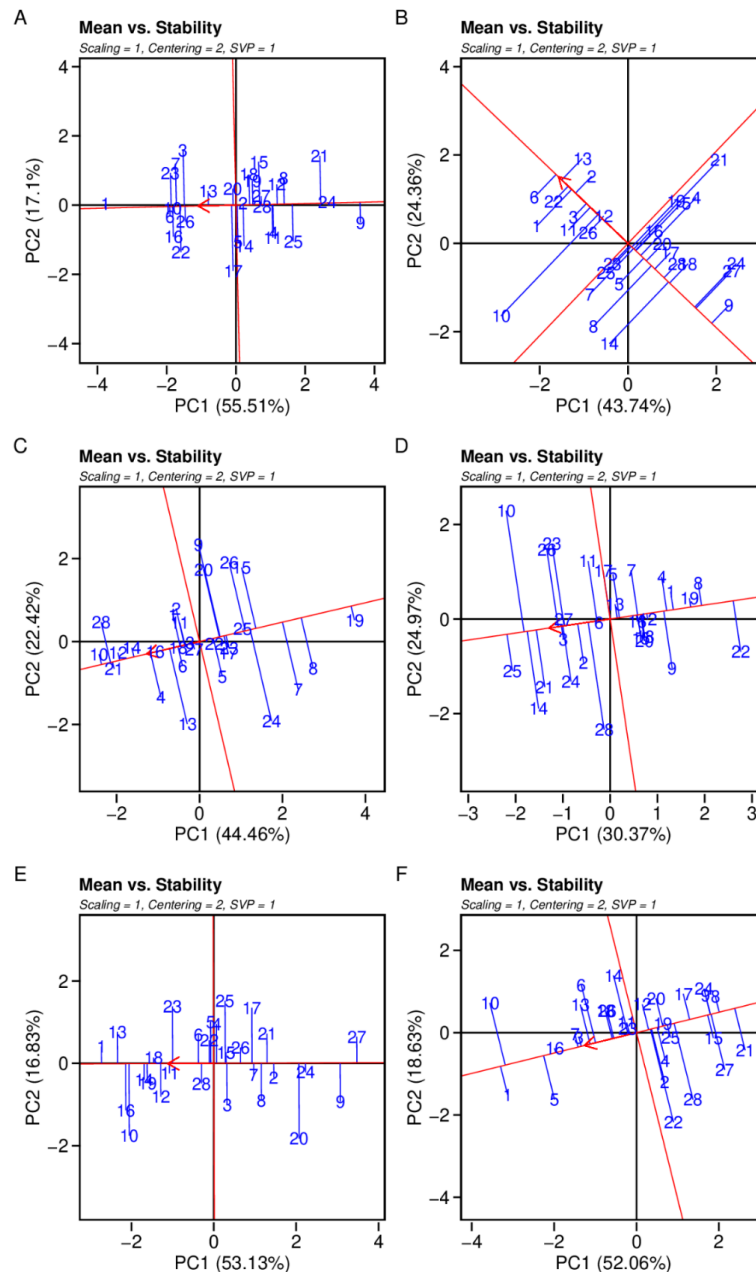
Quanto a média e estabilidade, as cultivares com melhor desempenho em relação ao ácido graxo palmítico (16:0), a AS 3610 IPRO apresentou o melhor desempenho no ambiente de ALTA altitude e a 58160RSF IPRO no ambiente de BAIXA altitude (Figura 3a, 3b). Para o ácido esteárico (18:0), pode-se destacar cultivares com melhor desempenho em ambiente de ALTA (M5705 IPRO, TMG 7062 IPRO, NS 6601 IPRO, M5838 IPRO e M5947 IPRO) e BAIXA altitude (NS 7300 IPRO, M5705 IPRO, M5947 IPRO e NS6601 IPRO) (Figura 3c, 3d).

Desta forma, a cultivar com menor média para 18:2 foi NS 6909 IPRO. Para o 18:3, as cultivares 95R51 IPRO e 7166RSF IPRO apresentaram melhor performance (menor média) para ALTA altitude, e as cultivares NS 6601 IPRO e 58160RSF IPRO para BAIXA altitude (Tabela 5, Figura 3e, 3f). Em relação a concentração dos aminoácidos ASP e GLU, destacam-se em ambos os ambientes as cultivares AS 3730 IPRO e 5855RSF IPRO (Figura 3).

Os ácidos graxos saturados 16:0, 18:0 e ácido oleico (18:1), apresentam pouca variação entre ambientes de ALTA e de BAIXA altitude. Entretanto, vale destacar a variabilidade genética para essa característica. Cultivares de ciclo mais longo (NS6909IPRO, NS6601IPRO, NS 7300 IPRO e AS 3730 IPRO), apresentaram

maiores concentrações de ácido oleico (18:1) (24,11%) em ambos os ambientes, quando comparadas com as cultivares precoces (22,33%) (50I52RSFIPRO, NS5445IPRO, 95R51RR) (Tabela 5). Segundo Kane *et al.* (1997), cultivares precoces têm maior sensibilidade a variações ambientais no período de enchimento de sementes.

Figura 3 - Média e estabilidade para ácido palmítico (16:0) em ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; para esteárico (18:0) em ambiente de alta (c) e baixa (d); para ácido linolênico (18:3) em ambiente de alta (e) e baixa (f) altitude para 28 cultivares de soja avaliadas

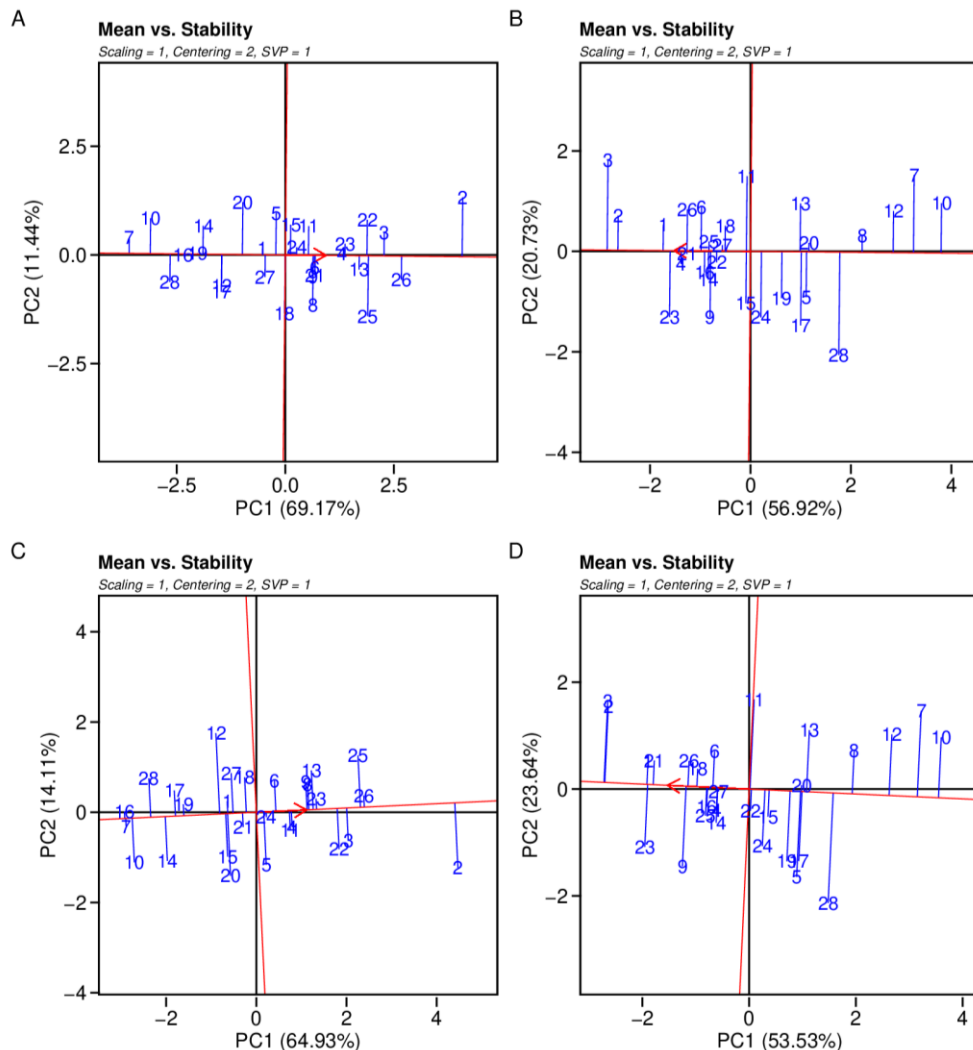


Nota: PC componente principal, SVP: decomposição de valor singular.

Fonte: Autoria própria

O ácido graxo linolênico (18:3) teve maior variação média entre ambientes de ALTA e BAIXA altitude (7,7 % vs 7,0%, respectivamente) (Tabela 5). Kane *et al.* (1997) encontraram resultados semelhantes. Os ácidos graxos poliinsaturados (18:2 e 18:3) são responsáveis por diminuir a estabilidade oxidativa do óleo (RAMOS *et al.*, 2009). O biodiesel produzido com alto teor de ácidos graxos poliinsaturados são propensos a oxidação, dificultando o armazenamento e reduzindo a qualidade geral de biocombustíveis de produtos alimentícios (SANTOS *et al.*, 2013; KONDA *et al.*, 2020). Quanto a concentração dos aminoácidos ASP e GLU, destacam-se em ambos os ambientes as cultivares AS 3730 IPRO e 5855RSF IPRO (Figura 4).

Figura 4 - Média e estabilidade para o aminoácido aspártico (ASP) em ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; e para o aminoácido glutâmico (GLU) em ambiente de alta (c) e baixa (d) altitude para 28 cultivares de soja avaliadas



Nota: PC componente principal, SVP: decomposição de valor singular.

Fonte: Autoria própria

Observou-se associação positiva entre GER x EA ($r: 0,9^{***}$), indicando que são igualmente importantes na descrição da qualidade fisiológica de cultivares (Figura 5). Além disso, GER e EA apresentaram associação positiva com o IVE ($r: 0,61^{***}$ e $r: 0,58^{***}$, respectivamente) e PROT ($r: 0,40^{**}$, $r: 0,49^{***}$). Também, constatou-se a associação positiva entre altitude (ALT) com EA ($r: 0,78^{***}$), GER ($r: 0,60^{***}$) e IVE ($r: 0,42^{**}$) (Figura 5), indicando que a produção de sementes em regiões de maior altitude promove maior potencial fisiológico.

Observou-se que a altitude afeta positivamente a concentração de proteína (ALT x PROT - $r: 0,71^{***}$). O conteúdo de proteína das sementes é conhecido como um dos caracteres mais complexos, e amplamente afetado pela interação genótipo x ambiente. Patil *et al.* (2017) enfatizam que, apesar da concentração de proteína estar relacionada ao ciclo da cultivar, a região geográfica é responsável por parte da variação observada, superior até mesmo ao grupo de maturidade. Sementes produzidas em ambientes de maiores altitudes tendem a maiores concentrações de PROT em comparação com OIL (Tabela 4), e estes componentes exercem grande influência sobre o potencial fisiológico das sementes.

As proteínas são extremamente importantes para espécies dicotiledôneas, sendo mobilizadas em maiores quantidades ao embrião durante a germinação e auxiliando no estabelecimento da plântula no campo (HAN; YANG, 2015). Bellaloui *et al.* (2017b) observaram índices de germinação acima de 80% em genótipos de soja que contém maiores concentrações de proteínas. Chebrolu *et al.* (2016), avaliando o efeito de estresse térmico sobre o desenvolvimento de sementes, relataram menor concentração de proteína em temperaturas elevadas (42 °C), resultando em severa redução da germinação. Em altas temperaturas ocorre a degradação de proteínas induzidas pelo calor, resultando em menor acúmulo durante os estádios de enchimento e maturação de sementes. Wei *et al.* (2020) observaram que genótipos de soja mutantes, carentes de proteínas de armazenamento (subunidades α' e α da proteína β -conglucina), apresentam taxa de germinação mais lenta quando comparada a testemunha.

A concentração de PROT apresentou relação positiva com o potencial fisiológico (PROT x GER $r: 0,40^{**}$, PROT x EA $r: 0,49^{***}$). Bellaloui *et al.* (2017a) reportaram correlação positiva entre a germinação e o envelhecimento acelerado com proteína ($r: 0,5^{***}$, $r: 0,3^{***}$), e negativas para o óleo ($r = -0,5^{***}$, $r: -0,3^{***}$), similares as observadas neste estudo. As associações positivas entre o ácido graxo 16:0 e os

caracteres fisiológicos também corroboram com os resultados obtidos por Bellaloui *et al.* (2017b).

A altitude apresentou correlação negativa com a concentração de óleo (ALT x OIL - $r: -0,80^{***}$). Temperaturas elevadas potencializam o incremento de óleo em detrimento ao acúmulo de proteína. Alsajri *et al.* (2020) e Chebrolu *et al.* (2016) também observaram incrementos na concentração de óleo com o aumento da temperatura.

Foi observada associação negativa entre OIL x PROT ($-0,83^{***}$), corroborando com estudos anteriores (ALSAJRI *et al.*, 2020; WIJEWARDANA *et al.*, 2019; MOURTZINIS *et al.*, 2017). Além disso, os caracteres fisiológicos (GER, EA, IVE) foram negativamente associados com OIL. Da mesma forma, observou-se associação negativa entre GER x OIL ($r: -0,57^{***}$), EA x OIL ($r: -0,67^{***}$), IVE x OIL ($r: -0,45^{***}$). A associação negativa de OIL com germinação ($r: -0,57^{***}$) e EA ($r: -0,67^{***}$), observadas neste estudo, podem ser explicadas pelo metabolismo de lipídios nas sementes de soja em condições de estresse.

O gene PLD α 1 (Phospholipase D α 1) está diretamente relacionada com a biossíntese de óleo em soja, além de estar envolvido na regulação de maturação e deterioração de sementes sob altas temperaturas e umidade (Fang *et al.*, 2017). Zhang *et al.* (2019), observaram que o silenciamento do gene PLD α 1KD (Phospholipase D α 1 - knockdown) reduz a deterioração de sementes, melhora a qualidade nutricional e vigor de sementes, sem ocasionar redução na concentração de óleo nas sementes. A redução de atividade de genes de dessaturação reduz níveis de espécies reativas de oxigênio (ROS) durante o desenvolvimento da semente e na germinação, melhorando assim, a tolerância ao estresse ambiental, o que permite ampla adaptação às condições de cultivo.

Além disso, destaca-se a associação positiva entre ALT x ASP ($r: 0,67^{***}$) e ALT x GLU ($r: 0,74^{***}$). Os ácidos graxos que apresentaram correlação positiva significativa com ALT foram 16:0 ($r: 0,43^{***}$) e 18:3 ($r: 0,53^{***}$) (Figura 5). O ácido graxo 16:0 também foi positivamente associado com GER ($r: 0,45^{***}$), 16:0 x EA ($r: 0,44^{***}$) e 16:0 x IVE ($r: 0,35^{**}$), demonstrando que o conteúdo de ácido graxo saturado afeta diretamente no potencial fisiológico das sementes.

As correlações reportadas entre os ácidos graxos enfatizam a rota de síntese dos mesmos. Observou-se elevada correlação negativa entre 18:1 x 18:2 ($r: -0,73^{***}$), 18:1 x 18:3 ($r: -0,52^{***}$) (Figura 5), evidenciando que um ácido deriva do outro pelo

processo de dessaturase da enzima FAD2. Esta correlação também foi observada por Abdelghany *et al.* (2020). Os programas de melhoramento buscam elevar a concentração do ácido graxo 18:1, visando a melhorar a qualidade do óleo de soja. O ácido graxo monoinsaturado é preferido na produção de biodiesel porque diminui a oxidação do óleo, melhora significativamente as propriedades de fluxo de frio e diminui as emissões de óxido de nitrogênio (NOx) (SIERRA-CANTOR; GUERRERO-FAJARDO, 2017). Diante do exposto, a busca por maiores teores de ácidos graxos saturados e monoinsaturados pode estar contribuindo indiretamente para a melhoria da qualidade fisiológica de sementes, por diminuir a dessaturação dos ácidos graxos e conseqüentemente as espécies reativas de oxigênio. Bellaloui *et al.* (2013) destacam efeito do ambiente sobre os ácidos graxos insaturados, assim, relataram maior concentração de ácido oleico em regiões de elevada latitude e temperatura amena.

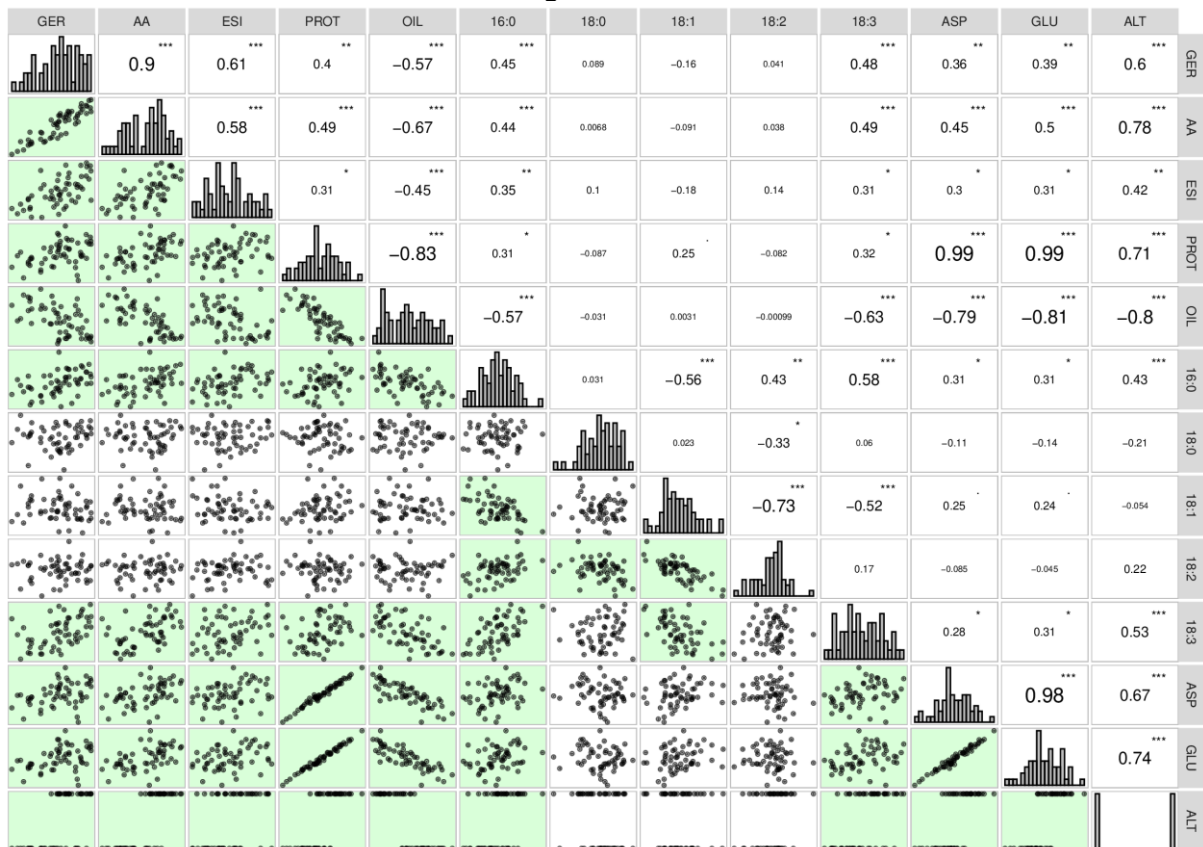
Além disso, o ácido esteárico (18:0), quando comparado aos demais ácidos graxos estudados, apresentou menor alteração frente ao ambiente de cultivo, não apresentando significância para o efeito de genótipo e nem de ambiente (Tabela 3). Bellaloui *et al.* (2013) identificaram menor sensibilidade dos ácidos palmítico e esteárico frente a mudança de temperatura e estresse hídrico, ao passo que, os ácidos graxos oleico, linoleico e linolênico, sofreram alteração em condição de estresse.

Corroborando com os resultados obtidos neste estudo, Abdelghany *et al.* (2020) e Alsajri *et al.* (2020), relataram que a temperatura afeta a composição química das sementes. Alsajri *et al.* (2020) observaram redução de ácidos poliinsaturados (18:2 e 18:3) em temperatura elevada e acúmulo de ácido oleico (18:1). Tal fato pode ser explicado pela atividade enzimática que regula o acúmulo e a conversão de ácidos graxos. A atividade da enzima ω -6 dessaturase é governada pelo gene FAD2-1A - o qual é degradado em alta temperatura - responsável pelo acúmulo e conversão (dessaturação) de ácido oleico em linoleico e linolênico (BELLALLOUI *et al.*, 2013).

Em ambos os ambientes de cultivo, a cultivar NS 6909 IPRO (24) apresentou a maior média para 18:1 (Figura 4a, b). A seleção de cultivares que possuem mecanismos genéticos adaptativos entre ambientes para determinadas características, como por exemplo 18:1, favorecem programas de melhoramento no desenvolvimento de genótipos que mantenham a concentração de ácido oleico elevada quando cultivados em diferentes ambientes (OLIVA *et al.*, 2006). Abdelghany *et al.* (2020) ressalta a importância do conhecimento da interação genótipo x ambiente

na composição dos ácidos graxos e salientam que cada genótipo pode responder de forma diferente. Com o conhecimento da resposta de cada cultivar, é possível melhorar a qualidade da composição química e fisiológica de sementes de soja.

Figura 5 - Correlação de Pearson entre a altitude do ambiente de cultivo, caracteres fisiológicos e composição química da semente de cultivares de soja. GER: germinação; EA: envelhecimento acelerado; IVE: índice de velocidade de emergência; PROT: conteúdo de proteína; OIL: conteúdo de óleo; 16:0: ácido palmítico; 18:0: ácido esteárico; 18:1: ácido oleico; 18:2: ácido linoleico; 18:3: ácido linolênico; ASP: ácido aspártico; GLU: ácido glutâmico



Nota: ALT: altitude. ***, **, * Significativo a 0,1, 1 e 5% de probabilidade de erro para o teste t. As correlações em destaque verde apresentaram-se significativas.

Fonte: Autoria própria (2021)

As correlações extremamente fortes observadas entre ASP x PROT ($r = -0,99^{***}$), GLU x PROT ($r = -0,99^{***}$), confirmam que os aminoácidos avaliados são componentes essenciais da proteína. Há poucos estudos avaliando a composição de aminoácidos e quantificando a influência do ambiente sobre ácido glutâmico (GLU) e aspártico (ASP). Correlações positivas de elevada magnitude foram observadas entre PROT com ASP ($r = 0,99^{***}$) e PROT com GLU ($r = 0,99^{***}$), e negativa entre OIL com ASP ($r = -0,79^{***}$) e OIL com GLU ($r = -0,81^{***}$). As observações de Wang *et al.* (2019) corroboram com as associações reportadas no estudo, e salientam que os maiores

níveis de ASP, GLU e o incremento de proteína estão relacionados à síntese de proteínas de reservas. Além disso, quando esqueletos de carbono são utilizados para produção de proteína, menor quantidade fica disponível para a síntese de lipídeos. Patil *et al.* (2017) reportaram que o ácido glutâmico (GLU) é o principal componente da proteína (19%), seguido por leucina (8%), arginina (8%), lisina (7%) e ácido aspártico (7%).

Ambientes de temperatura mais alta durante o período reprodutivo favorecem o aumento da concentração de óleo na semente além de serem mais favoráveis ao aumento de estresses abióticos a planta, ocasionando aumento de espécies reativas de oxigênio (EROs) que interagem principalmente com ácidos graxos poli-insaturados ocasionando o início da peroxidação de lipídios, por consequência o avanço da degradação de membranas e posterior morte celular, sendo uma das principais causas da perda de vigor (PONQUETT; SMITH; ROSS, 1992; SHARMA *et al.*, 2013).

A produção de sementes de soja de elevada qualidade fisiológica é um processo complexo e depende de vários fatores relacionados ao genótipo e ao ambiente. Em relação ao clima, baixos valores médios de precipitação, associados ao clima seco, favorecem o amadurecimento e a secagem natural das sementes. Além disso, baixas temperaturas também são desejáveis durante a colheita, melhorando a qualidade das sementes (HARTMANN-FILHO *et al.*, 2016).

Como síntese deste estudo, pode-se destacar a correlação positiva entre germinação e vigor com o teor de proteína e seus componentes (ácido aspártico e glutâmico). Além disso, por um lado, o potencial fisiológico da semente (germinação e vigor) foi potencializado em ambientes de maior altitude, devido a maior concentração de proteína na semente produzida nesses ambientes, e esta serve como fonte de energia para o embrião no processo de germinação, auxiliando no estabelecimento e desenvolvimento das plantas no campo (WEI *et al.*, 2020). Por outro lado, o incremento do teor de óleo em ambientes de menor altitude foi negativamente associado com potencial fisiológico das sementes. De acordo com Pal *et al.* (2016), a qualidade da semente contribui de 20-25% com a produtividade da cultura. Neste contexto, deve-se escolher ambientes adequados que maximizem a qualidade das mesmas.

Em suma, a crescente demanda de alimentos para suprir o aumento populacional desafiam os melhoristas a desenvolverem genótipos adaptados e produtivos ao ambiente. Nesse sentido, atrelar genética a população alvo de

ambientes é uma via que garante qualidade da semente, beneficiando toda a cadeia (produtiva, industrial e alimentícia).

3.4 Conclusões

Ambientes de ALTA altitude (acima 800m) produzem sementes de soja com maior concentração de proteína (38,4%) e os de BAIXA maior concentração de óleo (22,9%). Sementes com maior concentração de proteína apresentam potencial fisiológico superior (PROT x EA r: 0,49***), e o teor de óleo foi negativamente associado com o potencial fisiológico (EA x OIL r: -0,67***).

O conteúdo do ácido graxo saturado palmítico correlacionou-se positivamente com o potencial fisiológico das sementes de soja (16:0 x EA r: 0,44***). Ambientes de elevada altitude (acima 800m) maximizam a qualidade fisiológica das sementes de soja (ALT x EA r: 0,78***).

4 TEORES DE ÓLEO, PROTEÍNA E PRODUTIVIDADE DE SOJA EM FUNÇÃO ALTITUDE E REGIÃO DE CULTIVO

4.1 Introdução

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é considerada a commodity de maior importância econômica no mundo. A produção mundial da semente na safra 2019/2020 foi de 337,3 milhões de toneladas, sendo o Brasil maior produtor com 126,0 milhões de toneladas (FAO, 2020). Devido aos elevados teores de óleo e proteína na semente, a soja é utilizada na fabricação de diversos produtos, liderando a produção de proteína para alimentação animal, e matéria prima de biodiesel.

A soja tem grande potencial para substituição parcial do diesel convencional, sendo um recurso renovável e sustentável, colaborando na redução de emissão de poluentes (WU *et al.*, 2013; LEITE *et al.*, 2019). Atualmente, cerca de 77% do biodiesel do mundo é produzido a partir de óleo vegetal, e a soja representa 27% (OECD/FAO, 2020). Em 2020, a produção Brasileira de biodiesel foi estimada em 6,27 bilhões de litros, sendo que aproximadamente 71% desse volume foi produzido a partir de óleo de soja (USDA, 2020).

O teor de óleo da semente da soja pode variar de 17 a 24%, enquanto o teor de proteína de 37 a 42% (PATIL *et al.*, 2017). Diversos estudos comparando a composição química das sementes relatam maior concentração de óleo e proteína na soja produzida no Brasil, quando comparada ao EUA e a Argentina (MATEI *et al.*, 2018; ROTUNDO; MILLER-GARVIN; NAEVE, 2016; IBÁÑEZ *et al.*, 2020). Teores de 21% de óleo e 39% de proteína são atraentes ao mercado de esmagamento e produção de farelo (STOBAUGH *et al.*, 2017). Essas variações podem ocorrer devido ao genótipo e a interação genótipo x ambiente (G x E), os quais atuam sobre a produtividade e a composição de sementes. As condições ambientais, como latitude, altitude, temperatura e precipitação, além das características do solo e práticas de manejo da cultura, afetam diretamente a concentração de óleo e de proteína (VOLLMANN *et al.*, 2000; CHOI *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017; ASSEFA *et al.*, 2018; ANDA *et al.*, 2020).

O Brasil possui grande extensão territorial, e a cultura da soja é cultivada em uma grande amplitude de latitude, do Sul ao Norte do país, o que proporciona cultivo em diferentes altitudes e condições climáticas. Altitude e temperatura apresentam relação acentuada em regiões de clima subtropical e tropical. A temperatura do ar

decrece com a elevação da altitude, e pequenas mudanças de altitude causam variações no ambiente (ALVARES *et al.*, 2013).

No Paraná, a proporção de alteração da temperatura em função da altitude é de aproximadamente 1 °C/126m (FRITZSONS; MANTOVANI; AGUIAR, 2008). Associações entre temperatura e composição química das sementes tem sido reportada por inúmeros autores (PÍPOLO; SINCLAIR; CAMARA, 2004; ROTUNDO; WESTGATE, 2009; CHOI *et al.*, 2016; MOURTZINIS *et al.*, 2017; HOSSAIN *et al.*, 2019; ALSAJRI *et al.*, 2020). Mourtzinis *et al.* (2017) destacam que a concentração de óleo na semente pode ser potencializada com maior temperatura, enquanto a concentração de proteína é reduzida em maiores temperaturas.

Atualmente, a remuneração aos produtores é efetuada com base na quantidade produzida de sementes, todavia, a tendência é que este sistema seja alterado para um sistema de preço baseado na previsibilidade e na qualidade (MARTIN, 2015; XING *et al.*, 2018). Frente a crescente demanda por maior quantidade de proteína, óleo e biodiesel, para a próxima década (OECD-FAO, 2020), uma possível alternativa para suprir esse déficit poderá ser a recomendação e o posicionamento de cultivares de acordo com a região de produção, a fim de potencializar a produção de óleo e/ou proteína, com reflexos na remuneração ao produtor pela qualidade da matéria prima. Diante disso, as indústrias de processamento têm sido desafiadas a desenvolver um modelo geral de efeitos ambientais na composição da semente para prever locais de cultivo e/ou condições climáticas que proporcionem produção de soja de alta qualidade (ROTUNDO; WESTGATE, 2009).

Nesse sentido, objetivou-se neste estudo foi determinar ambientes para a maximização da produção de óleo e de proteína, e, assim, identificar cultivares de soja com elevado potencial de rendimento de sementes, óleo e proteína em ambientes de alta e baixa altitude.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Material vegetal e condução de experimentos no campo

Foram avaliadas 28 cultivares de soja representativas de diferentes programas de melhoramento, recentemente disponibilizadas para cultivo na região Sul do Brasil, que se encontram descritas na Tabela 1. As cultivares usadas para

realização do experimento foram adquiridas de empresas de produção de sementes com germinação e vigor acima de 85%. Os experimentos no campo foram conduzidos nas safras de 2017/2018 e 2018/2019 em diferentes ambientes, classificados como alta (846 a 963 metros) e baixa altitude (336 a 480 metros) (Tabela 2). Os locais de alta altitude são classificados como Cfb (clima subtropical úmido com verão quente), enquanto os de baixa altitude pertencem a classificação Cfa (clima subtropical úmido com verão temperado), conforme classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos completamente casualizados, com três repetições. As unidades experimentais foram constituídas por quatro linhas de 5 m de comprimento, espaçadas por 0,5 m entre linha, totalizando 10 m² e com densidade de 34 sementes m⁻². O manejo de adubação, pragas, doenças e plantas daninhas foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura.

4.2.2 Caracteres avaliados

O rendimento de sementes (RG, kg ha⁻¹) foi quantificado com a colheita de duas linhas centrais da parcela (5 m²), com umidade corrigida para 13%. O peso de mil sementes (PMS, g) seguiu-se a regra da RAS, onde foram utilizadas oito repetições de 100 sementes, obtidas da porção “Semente Pura”, e calculou-se a variância, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos valores obtidos das pesagens. O resultado da determinação foi calculado multiplicando-se por 10 o peso médio obtido das repetições de 100 sementes, se o coeficiente de variação não exceder 4%. Se o coeficiente de variação excedeu os limites já mencionados, outras oito repetições de 100 sementes foram contadas, pesadas e calculado o desvio padrão das 16 repetições. Desprezam-se as repetições com divergência da média superior ao dobro do desvio padrão. Multiplica-se por 10 a média do peso das demais repetições de 100 sementes, sendo este o resultado do teste. O resultado foi expresso em gramas com o número de casas decimais correspondentes às utilizadas nas pesagens menos uma, fazendo-se a devida aproximação no final.

O conteúdo de óleo (OIL, g kg⁻¹) e proteína (PROT, g kg⁻¹) foi avaliado utilizando espectrofotômetro - NIRS (Near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS), modelo NIR Perten® DA 7250. O rendimento de óleo (OILY, kg ha⁻¹) e de proteína

(PROTY, kg ha⁻¹) foi obtido pelo produto do conteúdo de óleo e de proteína pelo rendimento de sementes.

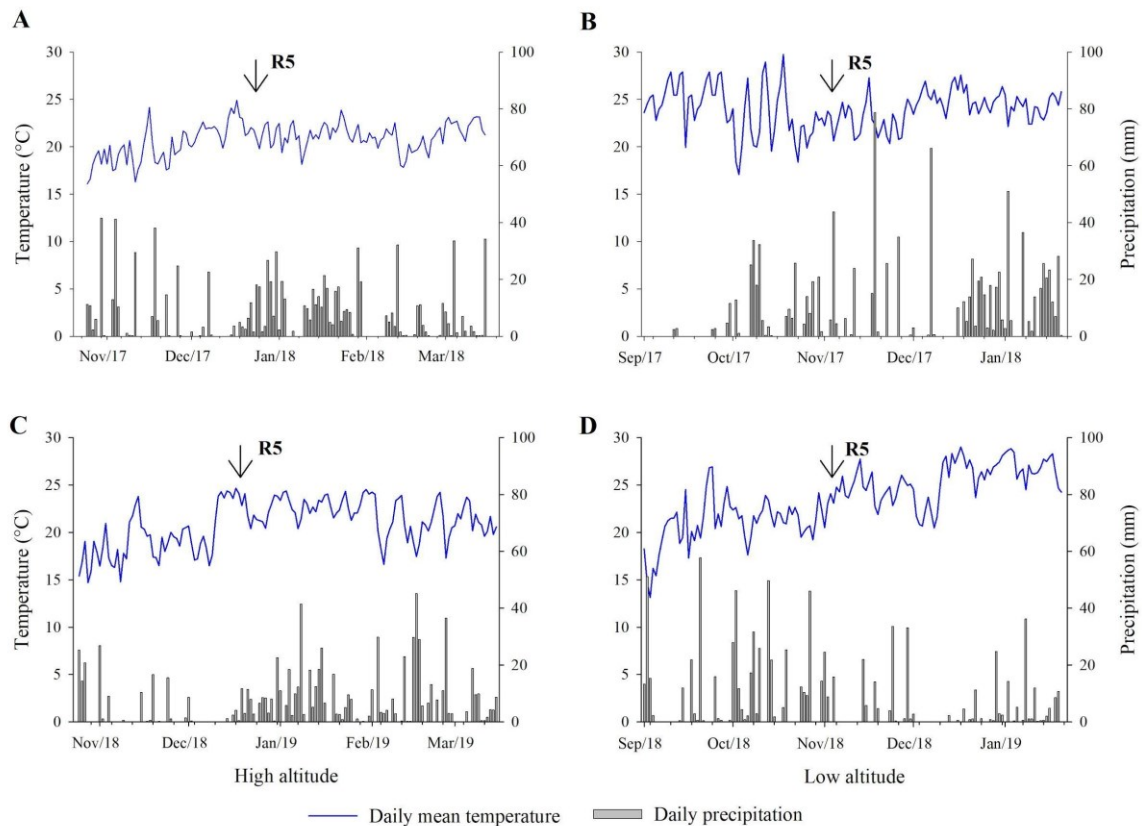
4.2.3 Análises estatísticas

A análise gráfica de média e estabilidade foi realizada para os caracteres avaliados. Os parâmetros usados foram: dados sem transformação (transformação = 0), escala de dados por desvio padrão (escala = 1, SD com escala), dados focados no genótipo mais interação genótipo x ambiente (G + GE) (centralização de dados = 2) e partição de valores singulares (SVP = 1, foco no genótipo). Análise de associação entre caracteres e locais com os mesmos parâmetros e a partição de valores singulares com foco no ambiente (SVP = 2). A análise de média e de estabilidade foi realizada usando a função `gge()`, e a análise de associação com função `gtb()` do pacote “metan” (OLIVOTO; LÚCIO, 2020) no software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2020). A análise de regressão linear foi utilizada para verificar o comportamento das variáveis: conteúdo de óleo e proteína em função da altitude, em nível de 5% de probabilidade. Todas as análises foram realizadas no tempo 0 após a colheita.

4.3 Resultados e discussões

A temperatura média diária do ar e a precipitação em ambientes de alta e baixa altitude são descritos na (Figura 6). No ambiente de alta altitude observou-se a temperatura média de 20,6 e 19,8 °C, e a precipitação acumulada de 1378 e 1294 mm, para as safras 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente. A média de temperatura do ar no ambiente de baixa altitude foi de 24,4 e 24 °C, com precipitação acumulada de 1582 e 1346 mm para as safras 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente. Assim, observou-se a diferença de 3,8 e 4,2 °C na temperatura média entre os ambientes de alta e de baixa altitude, nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente. Durante o estágio de enchimento de sementes R5 (FEHR; CAVINESS, 1977), a temperatura média foi de 3,5 a 4 °C, superior nos ambientes de baixa em relação aos de alta altitude.

Figura 6 - Dados meteorológicos de temperatura média do ar e precipitação diária durante a safra de soja 2017/2018 em a) ambientes de alta e b) baixa altitude, e durante a safra 2018/19 em c) ambientes de alta e d) baixa altitude



Nota: R5: estágio de enchimento de sementes.

Fonte: Simepar (2021)

O rendimento médio de sementes em ambientes de alta e de baixa altitude foi de 3,832 e 4,105 kg ha⁻¹, sendo 7,13% a mais no ambiente de baixa altitude (Tabela 6). O ambiente de baixa altitude, também proporcionou incremento de 5,5, 13,82 e de 1,85% no conteúdo de óleo (OIL), rendimento de óleo (OILY) e rendimento de proteína (PROTY), respectivamente. O valor médio de PMS no ambiente de alta (179 g) foi 5,43% superior ao ambiente de baixa altitude (170 g) (Tabela 6), demonstrando esse não ser o principal componente de rendimento de sementes observado nesse estudo, pois o ambiente de Baixa altitude obteve as maiores produtividades de sementes. O conteúdo de proteína (PROT) também foi 6,15% superior no ambiente de alta, em relação ao de baixa altitude.

Vale destacar a presença da variabilidade genética e do efeito no ambiente (altitude) sobre o rendimento de sementes de soja (RG), peso de mil sementes (PMS), conteúdo de óleo (OIL), proteína (PROT), rendimento de óleo (OILY) e proteína (PROTY). Outros estudos também têm relatado o efeito de genótipo e de ambiente

sobre o rendimento e a composição química de sementes de soja (MATEI *et al.*, 2018; UMBURANAS *et al.*, 2018; ASSEFA *et al.*, 2019).

Tabela 6 - Valores mínimos, máximos e médias observadas nos ambientes de alta e baixa altitude para rendimento de grãos (RG) kg ha⁻¹, peso de mil sementes (PMS) em g, conteúdo de óleo (OIL) em g kg⁻¹, e conteúdo de proteína (PROT) em g kg⁻¹, rendimento de óleo (OILY) em kg ha⁻¹ e rendimento de proteína (PROTY) em kg ha⁻¹, para 28 cultivares de soja conduzidas nas safras 2017/18 e 2018/19

Ambiente	Safra	Descrição	RG	PMS	OIL	PROT	OILY	PROTY
Alta	2017/18	Min	2735	152	176	329	526	1001
		Max	6358	229	232	397	1287	2333
		Média	4692	189	201	365	945	1712
	2018/19	Min	1489	131	194	374	344	581
		Max	4553	231	251	445	886	1843
		Média	2543	165	218	404	552	1029
Baixa	2017/18	Min	3032	134	187	299	584	928
		Max	5752	215	238	391	1249	2083
		Média	4454	164	208	349	927	1554
	2018/19	Min	2222	142	213	343	519	861
		Max	6000	238	263	406	1499	2240
		Média	3582	179	238	373	852	1336
Média geral Alta			3832	179	208	380	788	1439
Média geral Baixa			4105	170	220	358	897	1467
Diferença (%)			7,13	5,43	5,58	6,15	13,82	1,95

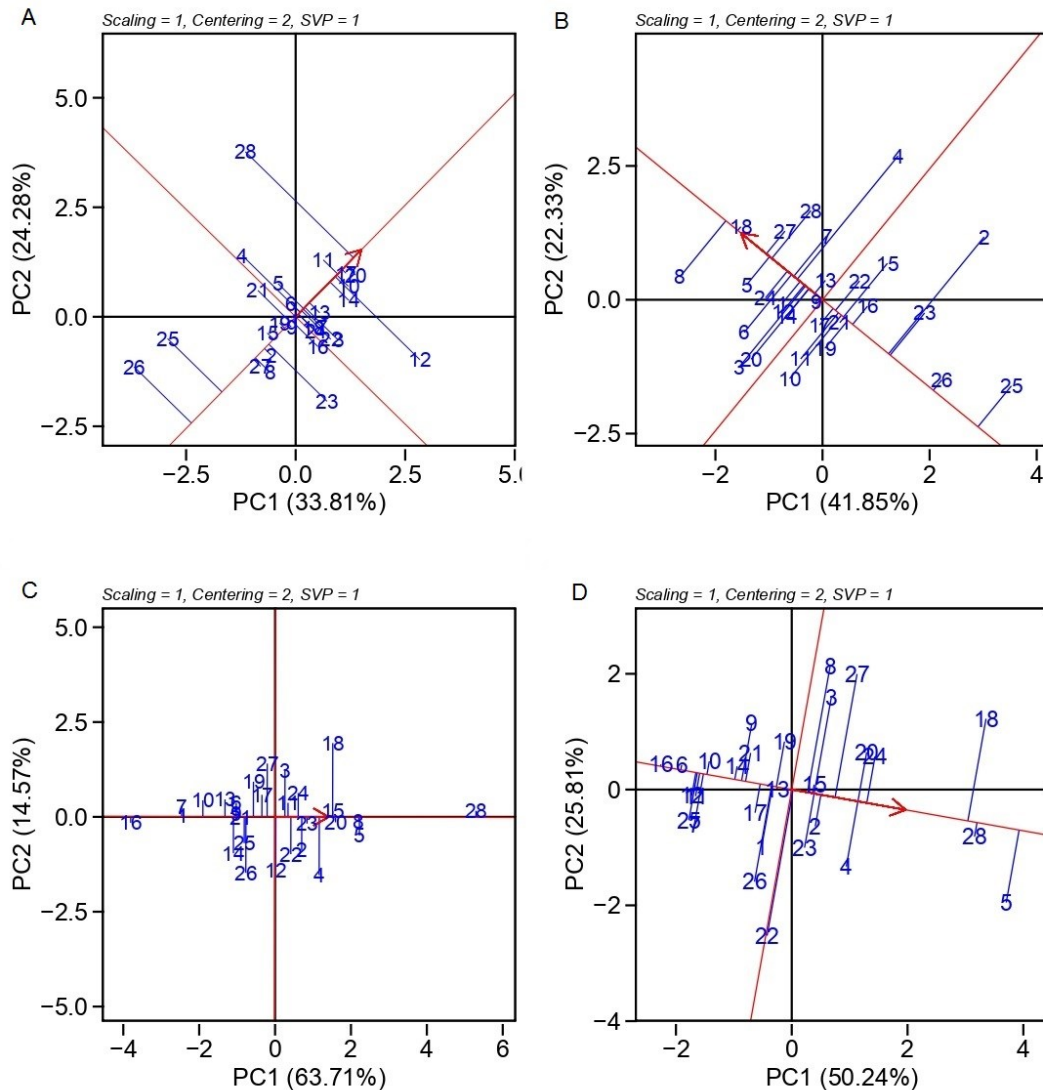
Fonte: Autoria própria (2021)

Utilizando a análise de média e de estabilidade foi possível evidenciar o desempenho diferenciado para o conjunto de cultivares e ambientes avaliados. No ambiente de alta altitude, a cultivar TMG 7062 IPRO (28) apresentou maior média de rendimento de sementes e a cultivar AS 3610 IPRO (1) foi a mais estável. No ambiente de baixa altitude, as cultivares com maiores médias produtivas foram 50I52RSF IPRO (8) e NS 5445 IPRO (18) e as cultivares NS 5445 IPRO (18), NS 6601 IPRO (21) as mais estáveis (Figura 7b).

Ambientes com menor altitude, com temperatura média mais elevadas (24,2 °C), apresentaram incremento no RG (Tabela 6). Alsajri *et al.* (2020) reportaram maior rendimento de sementes por planta em temperatura próxima de 25° C, considerada ótima no desenvolvimento da cultura da soja. O aumento da temperatura beneficia o RG, entretanto, esse aumento deve estar abaixo da temperatura ideal de crescimento, caso contrário, a temperatura exerce impacto negativo sobre o rendimento da soja (QIAO *et al.*, 2019; ALSAJRI *et al.*, 2020).

Para o caractere peso de mil sementes (PMS), em ambos os ambientes, a cultivar TMG 7062 IPRO (28) apresentou maior média e estabilidade (Figura 7c, 7d).

Figura 7 - Média e estabilidade para rendimento de sementes (RG) em kg ha⁻¹ para ambiente de alta (a) e baixa (b) altitude; e para peso de mil sementes (PMS) em g, em ambiente de alta (c) e baixa (d) altitude para 28 cultivares de soja avaliadas



**Nota: PC componente principal, SVP: decomposição de valor singular.
Fonte: Autoria própria (2021)**

Além disso, no ambiente de alta altitude, as cultivares 50I52RSF IPRO (8) e 68I70RSF IPRO (5) apresentaram elevada média (PMS), e as cultivares mais estáveis foram 5958RSF IPRO (9), AS 3610 IPRO (1) e 50I52RSF IPRO (8) (Figura 7c). Nos ambientes de baixa altitude, a cultivar com maior média de PMS foi a 68I70RSF IPRO (5), seguida pelas cultivares TMG 7062 IPRO (28), NS 5445 IPRO (18) e NS 6909 IPRO (24), enquanto as mais estáveis foram as cultivares M6410 IPRO (16), M5917 IPRO (13) e 58I60RSF IPRO (6) (Figura 7d).

Em condições de cultivo de alta altitude, onde as temperaturas médias observadas foram mais amenas, as cultivares apresentaram maior média para peso

de mil sementes (Tabela 6; Figura 7c), o que também foi observado em outros estudos (CHOI *et al.*, 2016; ALSAJRI *et al.*, 2020). Jumrani e Bhatia (2018), estudando sobre o impacto do estresse por alta temperatura em soja, observaram que o aumento de 4 °C reduziu em até 12% o peso da semente. Esses resultados corroboram com o presente estudo, onde observou-se a redução de 5,43% no PMS em ambiente de baixa altitude, e a associação negativa entre o caractere e os locais de baixa altitude (Tabela 6, Figura 7c).

A redução do peso de sementes com o aumento da temperatura pode estar associada a concentração de CO₂ atmosférico, sendo este insuficiente para saturar a capacidade potencial da rubisco (ribulose 1,5-bifosfato carboxilase), enzima responsável pela carboxilação primária em plantas C₃ (TAIZ; ZEIGER, 2004). Nesse sentido, com o aumento da temperatura do ar, pode ocorrer o encurtamento do ciclo de desenvolvimento da cultura e o aumento da respiração do tecido vegetal, reduzindo o acúmulo de carbono e, conseqüentemente, o peso de sementes (TAIZ; ZEIGER, 2004; TAIZ *et al.*, 2017).

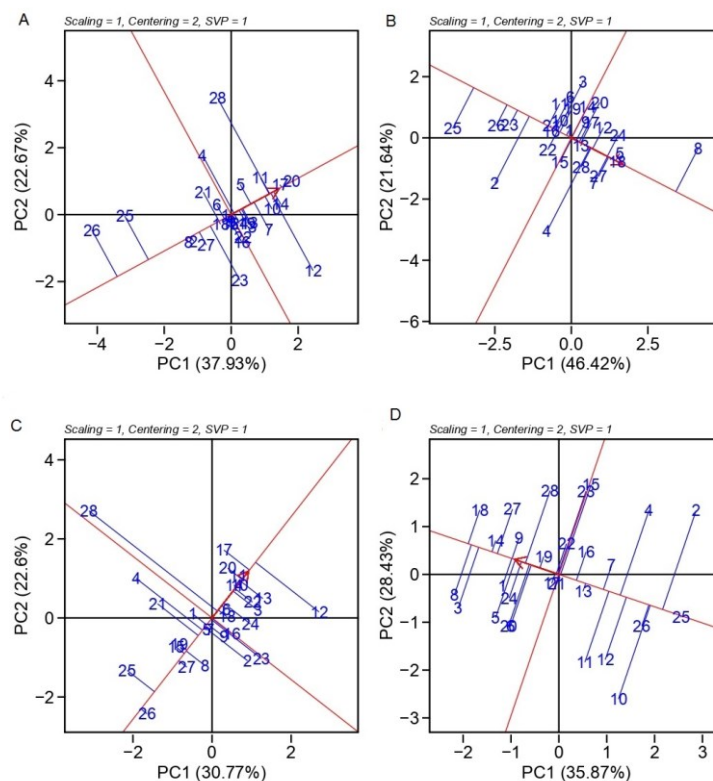
No ambiente de alta altitude, as cultivares NS 6006 IPRO (20) e NA 5909 RG (17) apresentaram a maior média de rendimento de óleo (OILY) e elevada estabilidade (Figura 8a). No ambiente de baixa altitude, a cultivar 50I52RSF IPRO (8) apresentou melhor desempenho médio, seguida pelas cultivares NS 5445 IPRO (18), 68I70RSF IPRO (5) e 95R51 IPRO (27) (Figura 8b). As cultivares mais estáveis neste ambiente foram NS 5445 IPRO (18), M6410 IPRO (16) e NS 6601 IRPO (21). A média de OILY para o ambiente de alta e de baixa altitude foram 788 e 897 kg ha⁻¹, respectivamente, com superioridade de 13,82% para o ambiente de baixa altitude (Tabela 6).

No ambiente de alta altitude, a cultivar M5838 IPRO (12) apresentou maior média para o rendimento de proteína (PROTY), seguida por NA 5909 RG (17), NS 6006 IPRO (20) e M5730 IPRO (11). As mais estáveis foram as cultivares M5730 IPRO (11), M5947 IPRO (14) e M5730 IPRO (10) (Figura 8c). Já para o ambiente de baixa altitude, as cultivares com maiores PROTY foram a NS 5445 IPRO (18), 50I52RSF IPRO (8), 5855RSF IPRO (3), M5947 IPRO (14) e 95R51 IPRO (27), enquanto a mais estável foi a NS 7300 IPRO (25), seguida por M5917 IPRO (13), NA 5909 RG (17) e AS 3730 IPRO (2) (Figura 8d). As médias de PROTY apresentaram maior amplitude no ambiente de alta altitude, variando de 581 a 2.333 kg ha⁻¹ (Tabela 6). Para OILY e PROTY, cada ambiente apresentou uma cultivar em destaque para análise de média

e de estabilidade, ressaltando o maior efeito da interação genótipo x ambiente (G x E) sobre estas características.

Para apresentar elevado rendimento de óleo e/ou proteína (kg ha^{-1}), uma cultivar deve apresentar elevado conteúdo de óleo e/ou proteína e elevada produtividade de sementes. As cultivares que cumpriram este requisito para rendimento de óleo (OILY) foram a 50I52RSF IPRO (8) e NS 5445 IPRO (18) com 1110 e 978 kg ha^{-1} , respectivamente, no ambiente de baixa altitude. Para rendimento de proteína, potencializado em ambiente de alta altitude, as cultivares M5838 IPRO (12) e NA 5909 RG (17) apresentaram 1560 e 1473 kg ha^{-1} , respectivamente (Figura 7a). Assefa *et al.* (2018) relataram que para cada 1 Mg ha^{-1} no rendimento de sementes, há um incremento no rendimento de proteína de 0,35 Mg ha^{-1} e de 0,20 Mg ha^{-1} no rendimento de óleo.

Figura 8 - Média e estabilidade para rendimento de óleo (OILY) kg ha^{-1} , para ambiente de (A) alta e (B) baixa altitude, e rendimento de proteína (PROTY) em kg ha^{-1} , em ambiente de (C) alta e (D) baixa altitude de 28 cultivares de sojas avaliadas



Nota: PC componente principal, SVP: decomposição de valor singular.

Fonte: Autoria própria (2021)

De acordo com Taiz *et al.* (2017), as proteínas são formadas por aminoácidos que por sua vez são formados a partir de moléculas de nitrogênio. Perdas na atividade

de fotossíntese foliar correspondem a uma diminuição na quantidade de proteína solúvel nas folhas. Em plantas C3, a Rubisco é degradada durante a senescência foliar e é a principal fonte de proteína e de nitrogênio utilizada pelos componentes reprodutivos (sementes) (WATTAL; SIDDIQUI, 2015). Quando ocorre a translocação de N das folhas para sintetizar proteína nas sementes a taxa de N foliar (Rubisco) diminuem, por sua vez a taxa fotossintética decai fazendo com que a fixação de carbono e de produção de fotoassimilados para o semente seja prejudicada e, conseqüentemente, a produtividade também seja diminuída. Isso pode explicar a relação inversa entre rendimento de sementes e conteúdo de proteína, observada neste (Figura 10c) e em outros estudos (ASSEFA *et al.*, 2018; ASSEFA *et al.*, 2019; MATEI *et al.*, 2018).

O conteúdo de óleo (OIL, g kg⁻¹) variou entre os ambientes, de 208 g kg⁻¹ a 220 g kg⁻¹ para alta e para baixa altitude, com incremento de 5,58% no ambiente de baixa (Tabela 6, Figura 9d). Desta forma, é possível observar que a média e a estabilidade das cultivares de soja apresentaram diferentes performances quando cultivadas em ambiente de alta e baixa altitude. No ambiente de alta altitude, a cultivar 7166RSF IPRO (7) apresentou maior conteúdo de óleo (222 g kg⁻¹), seguido pela cultivar 68I70RSF IPRO (5) e NA 5909 RG (17), sendo que a cultivar 68I70RSF IPRO (5) destacou-se pela elevada média e estabilidade (Figura 9a). A cultivar 50I52 RSF IPRO (8) apresentou maior média de OIL no ambiente de baixa altitude com 241 g kg⁻¹, seguido pelas cultivares M6210 IPRO (15) e NA 5909 RG (17) (Figura 9b).

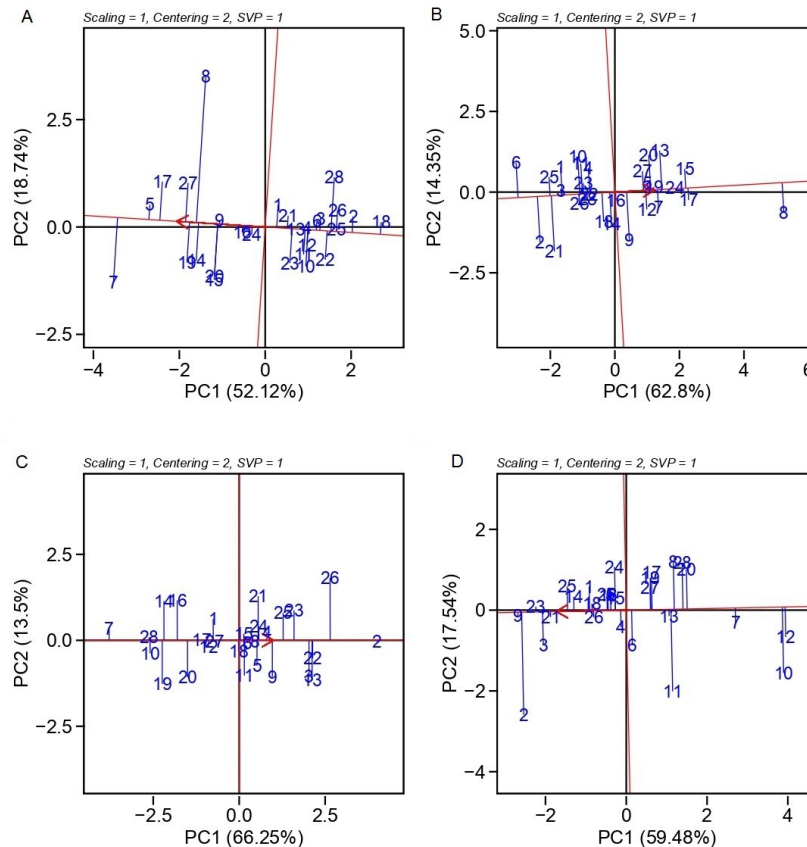
De modo geral, as cultivares com menor média de óleo apresentaram maior média de conteúdo de proteína (PROT). A cultivar AS 3730 IPRO (2) apresentou elevado conteúdo de PROT em ambos os ambientes, com média de 401 e 374 g kg⁻¹, para ambiente de alta e de baixa altitude. No ambiente de alta altitude, as cultivares NS 7709 IPRO (26), NS 6828 IPRO (22) e M5917 IPRO (13) destacaram-se pela média elevada (Figura 9c), enquanto no ambiente de baixa altitude, sobressaíram as cultivares 5958RSF IPRO (9), NS 6906 IPRO (23) e 5855RSF IPRO (3) por média elevada e estabilidade (Figura 9d).

Em relação ao conteúdo de proteína (PROT, g kg⁻¹), foi observado a média de 6,15% superior para o ambiente de alta altitude (380 g kg⁻¹) em comparação ao de baixa altitude (358 g kg⁻¹) (Tabela 6, Figura 9d). Foi verificado maior acúmulo de OIL em ambiente de baixa altitude (Tabela 6; Figura 10c). Neste ambiente, a temperatura

média diária foi 4 °C superior ao observado no ambiente de alta altitude durante o ciclo de desenvolvimento da soja.

O aumento na concentração de óleo, associado a temperaturas elevadas, tem sido reportado em outros estudos (REN; BILYEU; BEUSELINCK, 2009; BELLALLOUI *et al.*, 2017; MATEI *et al.*, 2018; UMBURANAS *et al.*, 2018). Bellaloui *et al.* (2017) e Umburanas *et al.* (2018) ressaltam que temperaturas amenas durante o enchimento de sementes podem acarretar na redução do conteúdo de óleo nas sementes, o que corrobora com os resultados encontrados.

Figura 9 - Média e estabilidade para conteúdo de óleo (OIL) em g kg⁻¹, para ambiente de (A) alta e (B) baixa altitude, e conteúdo de proteína (PROT) em g kg⁻¹, em ambiente de (C) alta e (D) baixa altitude de 28 cultivares de soja avaliadas



**Nota: PC: componente principal, SVP: decomposição de valor singular.
Fonte: Autoria própria (2021)**

Ren, Bilyeu, Beuselinck (2009) verificaram que o desenvolvimento de sementes de soja, sob regime de alta temperatura (30/37 °C), aumentou significativamente o teor de óleo e de ácido oleico. Anda *et al.* (2020) reportaram maior produção de óleo em condições de cultivo quente e seco.

A variabilidade para o conteúdo de óleo (176 a 263 g kg⁻¹) e para o de proteína (299 a 445 g kg⁻¹) corroboram com os resultados encontrados por Matei *et al.* (2018) em cultivares brasileiras de soja. Nos Estados Unidos, Assefa *et al.* (2019) observaram amplitudes de 132 a 246 g kg⁻¹ e 273 a 454 g kg⁻¹ para óleo e proteína, respectivamente. Rotundo, Miller-Garvin e Naeve (2016), em um estudo regional e temporal da composição de sementes de soja nos EUA, verificaram variação de proteína entre 32 a 37,4%, e óleo entre 16,7 a 20,5%, com amplitudes 15% e 20%, respectivamente. De modo geral, a composição química e a qualidade nutritiva da soja são alteradas de acordo com o país de origem. De acordo com Ibáñez *et al.* (2020), a soja brasileira possui maior proteína bruta, seguido pela soja de origem Americana, Indiana e Argentina.

Dentre as cultivares avaliadas, a 7166RSF IPRO (7) expressou grande diferencial devido a elevada correlação positiva com OIL em ambos os ambientes (Figura 10a, b). Além disso, as cultivares AS 3730 IPRO (2) e 5855RSF IPRO (3) evidenciaram associação positiva com PROT, nos ambientes de alta e de baixa altitude (Figura 10a, b). Estas cultivares destacadas possuem maior estabilidade no conteúdo de OIL e PROT, sendo menos influenciadas pelo ambiente de cultivo.

As cultivares M5838 IPRO (12), M5730 IPRO (11) e NS 6909 IPRO (24) apresentaram associação positiva com o caractere PROTY (Figura 10a). No ambiente de baixa altitude, as cultivares 68I70RSF IPRO (5), NS7300 IPRO (25) e NS 6909 IPRO (24) apresentaram associação positiva para PROTY (Figura 9b). No ambiente de alta altitude, as cultivares 68I70RSF IPRO (5), M5705 IPRO (10) e NS 6006 IPRO (20) apresentaram associação positiva com OILY, (Figura 10a). Em contrapartida, no ambiente de baixa altitude, as cultivares 50I52RSF IPRO (8), NS 6006 IPRO (20) e 95R51 RR (27) evidenciaram maior correlação com OILY (Figura 10b).

Os locais classificados como alta altitude (CAM, ABL e GUA) apresentaram associação positiva com a proteína (PROT), sendo que o local Abelardo Luz (ABL) expressou maior relação com o caractere (Figura 10c). Além disso, o PMS apresentou maior associação com os locais de alta altitude, corroborando com os resultados apresentados (Tabela 6). Por outro lado, o conteúdo de óleo (OIL) foi positivamente associado com os locais de baixa altitude (MED, PAL, RLZ) (Figura 10c). Observa-se, ainda, a associação negativa entre OIL x PROT.

O aumento de altitude acarretou o incremento de proteína, com taxa de 0,0343 g kg⁻¹ a cada metro de altitude (R^2 : 0,73*) (Figura 10d). Em contrapartida, observou-

se que o conteúdo de óleo é reduzido a uma taxa de $0,0242 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$ com o aumento da altitude ($R^2: 0,56\text{ns}$). Desta forma, o aumento de 100 m de altitude resulta no incremento de $3,43 \text{ g kg}^{-1}$ de proteína e redução de $2,42 \text{ g kg}^{-1}$ de óleo.

Durante a embriogênese, o fluxo de carbono da soja é especialmente dividido entre proteína e óleo. De acordo com Saldivar *et al.* (2011), ao longo do desenvolvimento das sementes da soja o acúmulo de óleo é rápido e ocorre em estágios iniciais, sendo constante durante todo o período de enchimento de sementes, enquanto a proteína é acumulada em fases posteriores, principalmente no período de senescência foliar. Assim, o aumento da temperatura pode reduzir o ciclo da cultura e, conseqüentemente, antecede o período de senescência das folhas, momento em que ocorre a maior deposição de proteína na semente (WATTAL; SIDDIQUI, 2015). Normalmente o aumento de 1% no conteúdo total de óleo equivale a redução de 2% no conteúdo total de proteína.

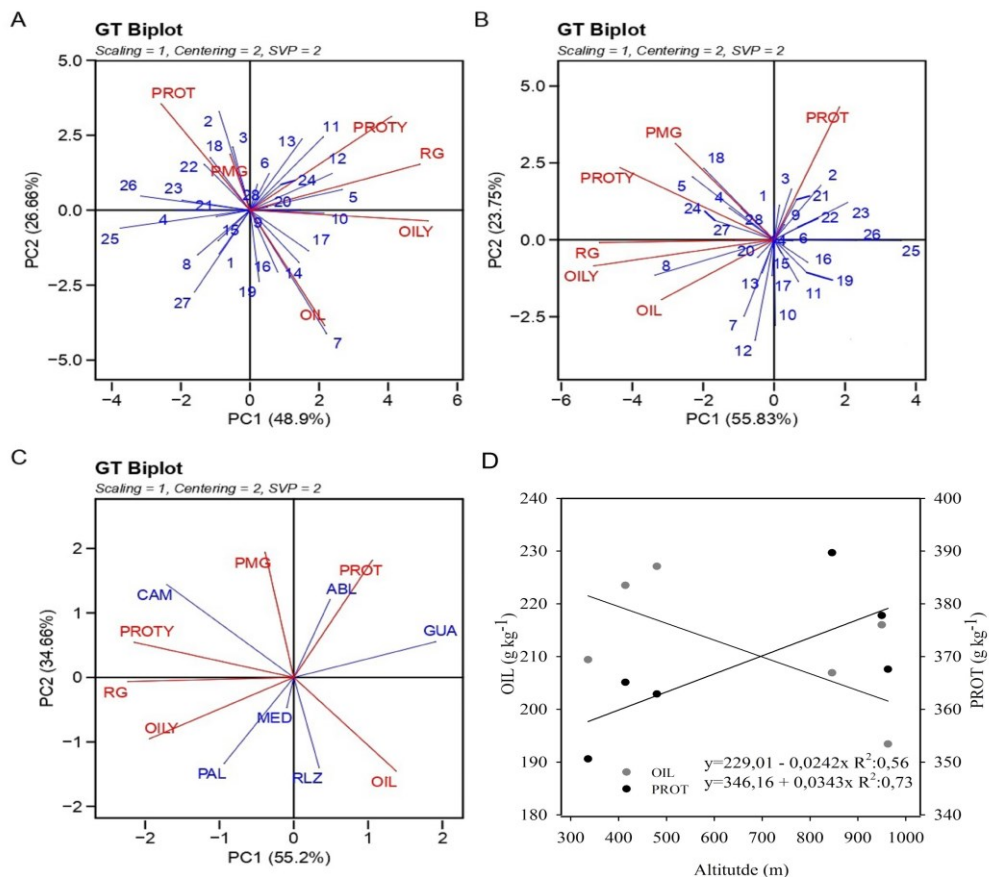
Com o aumento expressivo na busca por combustíveis de fontes renováveis e grande aumento do uso da soja para produção de biodiesel, o incremento de conteúdo de OIL na semente pode ser potencializado com produção em ambiente de baixa altitude, e com maior temperatura média durante o enchimento de sementes, visto que alguns estudos também têm relatado essa tendência (CARRERA *et al.*, 2011; MOURTZINIS *et al.*, 2017; KOHLER *et al.*, 2019; QIAO *et al.*, 2019).

O aumento de altitude do local de cultivo está associado ao aumento de proteína na semente (PÍPOLO; SINCLAIR; CAMARA, 2004; ROTUNDO; WESTGATE, 2009; MATEI *et al.*, 2018), fato também observado neste estudo, além disso o PMS está associado positivamente ao aumento do teor de proteína e com o aumento de altitude (Tabela 6; Figura 10c). Nesse contexto, Kohler *et al.* (2019) e Bellaloui *et al.* (2011), identificam reduções na concentração de proteína de sementes com o aumento da temperatura. Mourtzinis *et al.* (2017) ressaltam que a variabilidade da temperatura afeta a composição química da soja, sendo que o aumento da temperatura no estágio de maturação R5 a R8 ocasionou reduções nas concentrações de proteína. Carrera *et al.* (2011) destacam que ambientes com temperaturas mais amenas seriam mais adequadas para a produção de soja com maior conteúdo de proteína, o que justifica os resultados deste estudo (Tabela 6, Figura 10 c, d).

A interação entre ambiente e teor de proteína é descrita como complexa, principalmente quando está atrelada a precipitação e a temperatura (ROTUNDO; MILLER-GARVIN; NAEVE, 2016). Inúmeros trabalhos têm atribuído esta interação

complexa à presença de diversos QTL associados a conteúdo de proteína, com dois QTL principais reportados no Chr 15 e Chr 20 (DIERS *et al.*, 1992; PRENGER *et al.*, 2019).

Figura 10 - Associação entre caracteres e cultivares em ambiente de a) alta e b) baixa, c) associação entre caracteres e locais de condução, e d) efeito da altitude sobre o conteúdo de óleo e proteína de sementes da soja. Caracteres: RG: rendimento de sementes em kg ha⁻¹; PMS: Peso de mil sementes em g, OIL: conteúdo de óleo; PROT: conteúdo de proteína em g kg⁻¹; OILY: rendimento de óleo; PROTY: rendimento de proteína em kg ha⁻¹



Nota: Locais: ABL: Abelardo Luz – SC; CAM: Campos Novos – SC; GUA: Guarapuava – PR; MED: Medianeira – PR; PAL: Palotina – PR; RLZ: Realeza – PR.

Fonte: Autoria própria (2021)

Brzostowski e Diers (2017), utilizando a PI 407788A (alta-proteína QTL) em cruzamento com cultivares elite, conseguiram obter incremento de 11 g kg⁻¹ na proteína. Prenger *et al.* (2019) relataram incremento de 40 g kg⁻¹ de proteína, sem redução no rendimento. Estes autores enfatizam que apesar da correlação negativa de proteína com óleo e com o rendimento de sementes, assim como reportado neste estudo, a partir da utilização de técnicas de biotecnologia e seleção cuidadosa de progênie é possível desenvolver linhas de alto rendimento com alto conteúdo de proteína.

A produção de derivados da soja tendo como principal fonte a proteína, possuem tendência de aumento na demanda para a próxima década (OECD/FAO, 2020). Neste sentido, a escolha de ambientes e cultivares que maximizem o conteúdo de proteína na semente e o rendimento de proteína por hectare devem ser priorizados. Com os resultados obtidos no presente estudo, pode-se afirmar que ambientes de alta altitude potencializaram a PROT e PROTY, em comparação a ambientes de baixa altitude, que potencializaram o OIL e OILY (Tabela 6, Figura 10c, d).

Temperaturas amenas proporcionam uma taxa de degradação da matéria orgânica do solo mais lenta, mantendo a umidade do solo por maior período de tempo, não limitando a disponibilidade e a absorção de nutrientes, principalmente o nitrogênio, em períodos de menor disponibilidade hídrica (WANG *et al.*, 2016). As cultivares de soja estudadas apresentam potencial para produção de biodiesel, assim como a fonte proteica, devido ao elevado rendimento de sementes e o conteúdo de óleo e de proteína apresentado. Matei *et al.* (2018) e Woyann *et al.* (2019) ressaltam esse diferencial das cultivares brasileiras de soja, cultivadas principalmente na região Sul do país.

Neste sentido, associações entre ambientes e composição química da semente resultam em informações valiosas para desenvolver e direcionar estratégias do melhoramento da qualidade da semente, visando a atender as demandas do mercado. Visualiza-se ainda a possibilidade de fornecimento de matéria-prima em maior quantidade e com maior qualidade para a indústria alimentícia e de biodiesel, alocando genótipos específicos em locais de baixa e de elevada altitude.

Vale destacar ainda, que a remuneração ao produtor tem sido realizada por quantidade produzida de sementes, entretanto, uma adição (premium) pela composição da semente poderia aumentar a qualidade dos produtos gerados, além de garantir maior lucratividade do agricultor (UPDAW; BULLOCK; NICHOLS, 1976; STOBAUGH *et al.*, 2018; XING *et al.*, 2018). Em suma, a demanda do mercado poderá ser suprida com o emprego do melhoramento genético, manejo e região de produção, com intuito de maximizar o rendimento de proteína e de óleo por unidade de área.

4.4 Conclusões

Os resultados evidenciam que o ambiente de cultivo implica diretamente sobre a composição química das sementes de soja. Ambientes de alta altitude e temperatura mais amena favorecem incremento de proteína em 6,15%. Ambientes de baixa

altitude resultam no aumento de óleo, com incremento aproximado de 5,6%. Além disso, foi possível inferir que há efeito positivo da altitude no conteúdo de proteína ($0,0343 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$,) e negativo no conteúdo de óleo ($0,0242 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$).

As cultivares NS 6006 IPRO (20) e NA 5909 RG (17) apresentaram melhor performance produtiva de sementes para ambiente de alta, e para o ambiente de baixa, as cultivares 50I52RSF IPRO (8) e NS 5445 IPRO (18) se destacaram. A cultivar 7166RSF IPRO manteve elevada produtividade de óleo, tanto em ambientes de alta, quanto de baixa altitude.

Neste sentido, associações entre ambientes e composição química da semente resultam em informações valiosas para desenvolver e direcionar estratégias do melhoramento, recomendar cultivares e ambientes de produção, a fim de suprir a demanda do mercado de óleo e de proteína.

5 LOCAIS DE CULTIVO, CONDIÇÕES DE ARMAZENAMENTO, E TEMPO DE ARMAZENAMENTO SOBRE O POTENCIAL FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE SOJA

5.1 Introdução

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das culturas mais produzidas e comercializadas mundialmente, sendo responsável por movimentar a economia de diversos países produtores. Na última safra, o Brasil atingiu a marca de 135,8 milhões de toneladas produzidas em 38,5 milhões de hectares (USDA, 2020).

A adoção de sementes de qualidade é o ponto de partida para o estabelecimento de lavouras de soja com plantas fortes, vigorosas e bem estabelecidas. A qualidade de uma semente é definida através de sua germinação e vigor (GHASSEMI-GOLEZANI *et al.*, 2015; LAMICHANEY; MAITY, 2021). A germinação é a capacidade da semente desenvolver estruturas básicas para o desenvolvimento da planta, em condições favoráveis (BRASIL, 2009), e o vigor é a capacidade da semente, em emergir de forma rápida e uniforme, em condições adversas do ambiente (KRZYZANOWSKI *et al.*, 1999; FELICETI *et al.*, 2020). Sementes de baixo vigor resultam em plântulas fracas e com pouca possibilidade de se estabelecerem competitivamente no campo. Por outro lado, plantas mais vigorosas e de rápido estabelecimento inicial são resultado de sementes de alta qualidade, promovendo o estabelecimento da cultura em diferentes condições e ambientes (EBONE *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

O ambiente de cultivo pode exercer forte efeito sobre a expressão do potencial fisiológico e influenciar a composição química das sementes (MINUZI *et al.*, 2010; DELARMELINO *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2021). Portanto, sementes oriundas de diferentes ambientes podem apresentar diferentes concentrações de óleo e de proteína, contribuindo em alterações no poder germinativo, e em mudanças bioquímicas, que podem ser desencadeadas durante o armazenamento.

Outro aspecto de fundamental importância é a manutenção da qualidade da semente. Durante o armazenamento, a deterioração apresenta-se como um processo natural e dependendo da condição a qual é armazenada, esse processo pode ser retardado e minimizado (CORADI *et al.*, 2015; CORADI *et al.*, 2020). Temperatura e umidade são os principais fatores que contribuem para acelerar a deterioração das sementes (SHARMA *et al.*, 2013), além da sua composição. Segundo Balesevic-Tubic *et al.* (2005), alterações nos lipídios das sementes, durante o armazenamento,

desencadeiam redução nos fosfolipídios e ácidos graxos poliinsaturados, promovendo um declínio acentuado no vigor da semente.

O envelhecimento da semente e conseqüentemente a perda do vigor, também está associada ao acúmulo de superóxido radical, H₂O₂ e hidroxila que danificam a membrana celular, enzimas e ácidos nucléicos (SHARMA; GAMBHIR; MUNSHI, 2006). Além disso, a peroxidação de ácidos graxos poliinsaturados é considerada uma das principais razões para a baixa capacidade de armazenamento de sementes de soja (SHARMA *et al.*, 2013).

Sabe-se que há variabilidade genética entre cultivares de soja para a produção de óleo e de proteína (VOLLMANN *et al.*, 2000; CHOI *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2017; ANDA *et al.*, 2020; ASSEFA *et al.*, 2018), e que o ambiente influencia a produção destes componentes (ALSAJRI *et al.*, 2020; NAKAGAWA *et al.*, 2020), e que estes afetam diretamente a qualidade fisiológica de sementes de soja (BELLALLOUI *et al.*, 2017a; WEI *et al.*, 2020). Nesse contexto, é de extrema importância conhecer a interação entre o genótipo, o ambiente e o local de armazenamento para os parâmetros citados acima, a fim de selecionar ambientes que maximizem a produção, melhorem as condições de armazenamento e, conseqüentemente, a qualidade fisiológica de sementes de soja.

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi determinar o efeito do ambiente de cultivo e do local de armazenamento sobre o teor de óleo, proteína e qualidade fisiológica de sementes de soja durante 180 dias de armazenamento.

5.2 Material e métodos

Os experimentos no campo foram conduzidos nas safras de 2017/2018 e 2018/2019 em diferentes ambientes, classificados como alta (846 a 963 metros) e baixa (336 a 480 metros) altitude (Tabela 2). Os locais de alta altitude são classificados como Cfb (clima subtropical úmido com verão quente), enquanto os de baixa altitude pertencem a classificação Cfa (clima subtropical úmido com verão temperado), conforme classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013).

Foram avaliadas 28 cultivares de soja recentemente disponibilizadas para o cultivo na região Sul do Brasil (Tabela 1). As cultivares usadas para realização do experimento foram adquiridas de empresas de produção de sementes com germinação e vigor acima de 85%. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos completamente casualizados, com três repetições. As unidades experimentais

foram constituídas por quatro linhas de 5 m de comprimento, espaçadas de 0,5 m entre linha, totalizando 10 m², com densidade de 34 sementes m². O manejo de adubação, pragas, doenças e plantas daninhas foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura.

5.2.1 Colheita, secagem e padronização das amostras

No estágio de maturação fisiológica (R8 – FEHR; CAVINESS, 1977) foi realizada a colheita das duas linhas centrais de cada parcela (5m²). A umidade inicial das sementes variou de 15% a 22%. Duas amostras de cada unidade experimental foram armazenadas em embalagens semipermeável de papel multifoliado, mantidas em secador a 35 °C até a padronização da umidade (13%). Uma das amostras foi armazenada em câmara fria durante 180 dias (temperatura e umidade controlada em 5 °C e 50%). A outra amostra foi armazenada em barracão, sem controle de temperatura e umidade relativa do ar, evitando contato com o piso, simulando uma condição de armazenamento realizada por produtores de sementes da região. No barracão, foi implantado um Datalogger, modelo CEM DT-172, a fim de aferir a temperatura e a umidade relativa do ar da condição de armazenamento das sementes. As medições ocorreram de 30 em 30 minutos. O local de armazenamento de ambas as condições estava localizado na cidade de Realeza-PR.

5.2.2 Caracteres avaliados

A análise do potencial fisiológico das sementes foi realizada no Laboratório de Sementes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco – PR. Para a avaliação do potencial fisiológico das sementes foram utilizados os testes de germinação (GER) e de envelhecimento acelerado (EA).

Para o teste de germinação (GER) foram separadas quatro sub-amostras contendo 50 sementes cada, distribuídas uniformemente sob duas folhas de papel germitest, previamente umedecidas com água destilada a 2,5 vezes a massa seca e cobertas com outra folha. Em seguida, as sementes foram envoltas no papel germitest, e os rolos foram acondicionados em germinador com temperatura de 25 °C e fotoperíodo de 12 horas, durante oito dias. A avaliação foi realizada no 5º dia, e a contagem de sementes germinadas foi de acordo com os critérios estabelecidos pelas

Regras de Análises de Sementes (RAS) sendo os resultados expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

Para o teste de envelhecimento acelerado (EA) foram utilizadas 200 sementes, subdivididas em quatro subamostras de 50 sementes. As sementes foram acondicionadas em caixas de poliestireno transparente com tampa (gerbox), contendo 40 ml de água destilada. Sobre os recipientes foi utilizada uma tela de 2 mm para a sustentação das sementes. As caixas foram mantidas à temperatura de 41 °C por 48 horas em câmara B.O.D (KRZYZANOWSKI *et al.*, 1999). Após esse período, as sementes foram submetidas à germinação, seguindo o mesmo procedimento descrito para GER (BRASIL, 2009). A avaliação foi realizada no 5º dia, e a contagem de sementes germinadas foi feita de acordo com os critérios estabelecidos pela Regras de Análises de Sementes (RAS) sendo os resultados expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

As sementes foram analisadas para determinar o teor de óleo e proteína por meio de refletância no infravermelho próximo (NIR), usando um espectrofotômetro - NIRs (Near Infrared Reflectance spectroscopy), modelo NIR Perten® DA 7250.

As avaliações de germinação, envelhecimento acelerado (vigor), teor de óleo e de proteína foram realizadas no período 0, 60, 120 e 180 dias de armazenamento.

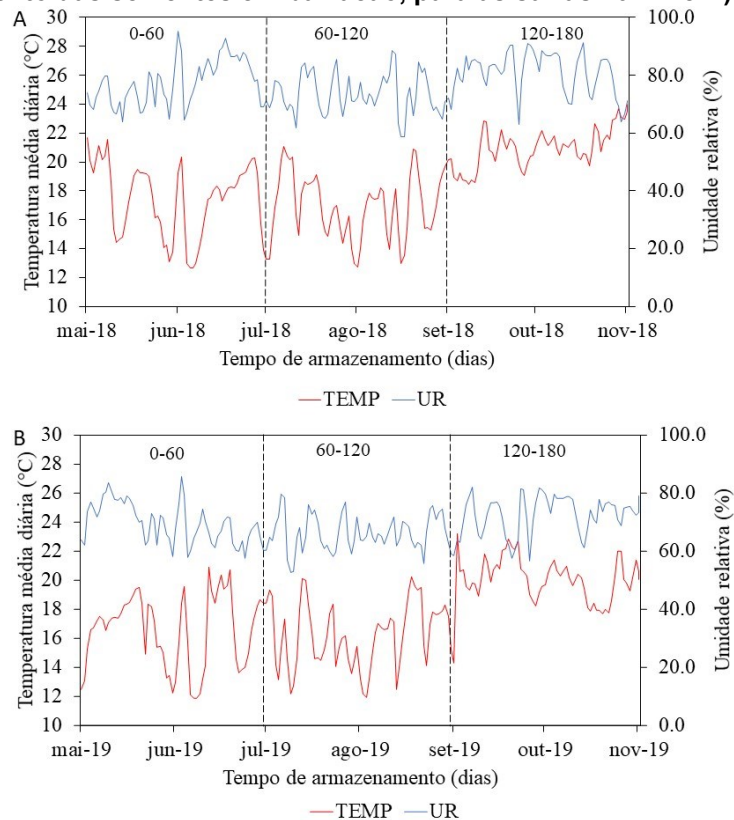
5.2.3 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), em esquema quadrifatorial 28 x 6 x 2 x 4 (cultivares x locais de cultivo x condições de armazenamento x tempo de armazenamento). Para os fatores qualitativos, foi realizada a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro e para o fator quantitativo foi realizado ajuste de regressão. A análise dos dados foi realizada com o software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2020) e as figuras no Microsoft Excel.

5.3 Resultados e Discussões

A temperatura (T) e a umidade relativa do ar (UR) da câmara fria (CF) foi constante e estável durante todo período de armazenamento (5 °C e 50%, respectivamente) (Figura 11). A temperatura média diária e a umidade relativa do ar no ambiente de armazenamento barracão (BAR), estão descritos na (Figura 11).

Figura 11 - Temperatura média diária (°C) e umidade relativa (%) durante os 180 dias de armazenamento das sementes em barracão, para as safras 2017/18 A) e 2018/19 B)



Fonte: Autoria própria (2021)

No BAR, a temperatura média foi de 18,4 °C; 17,6 °C e UR de 77,2%; 69,5% para as safras 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente. A temperatura variou de 0,8 °C e 7,7% de UR do ar na safra 2017/2018 e 2018/2019. Na safra 2018/2019, observou-se menores temperaturas na média diária e UR.

A temperatura (T) e a umidade relativa (UR) são extremamente importantes durante o período de armazenamento de sementes, quando se busca a manutenção da qualidade fisiológica (SHARMA *et al.*, 2013). O aumento médio na T e UR no último período de armazenamento (120-180 dias) em ambos os anos avaliados, ocorreu devido ao início da primavera e, conseqüentemente, aumento gradual da temperatura e das chuvas em relação ao inverno. Esse aumento na T e UR podem ter contribuído para o aumento das atividades metabólicas das sementes armazenadas em ambientes não controlados, coincidentemente com o período final de armazenamento, influenciando a qualidade fisiológica das sementes (Figura 11a, b).

Segundo Carvalho e Nakagawa (2012), temperaturas elevadas influenciam as atividades biológicas e aceleram as atividades respiratórias das sementes e dos microrganismos, causando perdas na qualidade fisiológica. Portanto, para assegurar

o elevado potencial fisiológico, o armazenamento em ambiente adequado com temperatura e umidade relativa do ar controlados é uma prática fundamental (AZEVEDO, 2003). Sementes armazenadas em ambientes com temperatura (< 15 °C) garantem maior qualidade e reduzem prejuízos ao setor sementeiro (DEMITO; AFONSO, 2009; CORADI *et al.*, 2020). Já, sementes, armazenadas em ambientes sem controle de temperatura, apresentaram redução de germinação e de vigor ao longo do tempo (AZEVEDO, 2003; JUVINO *et al.*, 2013; VIRGOLINO *et al.*, 2016).

A deterioração pode ficar mais intensa com o prolongamento do período de armazenamento, mesmo em ambientes com temperatura e umidade controlada (CUNHA *et al.*, 2009). Almeida *et al.* (2010) estudaram o comportamento de sementes de soja durante o armazenamento, e observaram a queda gradativa na germinação durante 180 dias, em temperatura ambiente. A análise de variância (ANOVA), apresentou interação significativa entre os fatores “Local de Cultivo x Cultivares x Condição de armazenamento x Tempo de armazenamento”, para todos os caracteres e safras 2017/2018 e 2018/2019 (Tabela 7).

Tabela 7 - Análise de variância (ANOVA) para os caracteres germinação (GER), envelhecimento acelerado (EA), conteúdo de óleo (OLEO) e conteúdo de proteína (PRO) de 28 cultivares, produzidas em Abelardo Luz - SC, Campos Novos - SC, Guarapuava - PR, Medianeira - PR, Palotina - PR e Realeza - PR, armazenadas em duas condições (barracão e câmara fria), durante 0, 60, 120 e 180 dias

FV	Quadrado médio									
	GL	Safr 2017/18				GL	Safr 2018/19			
		GER	EA	OLEO	PRO		GER	EA	OLEO	PRO
Local de cultivo	5	31646***	41785***	299***	506***	3	16849***	34918***	1492***	2474***
Cultivares	27	6744***	7962***	580***	136***	27	1494***	1472***	37***	73***
Condição de armazenamento	1	63926***	142444***	63***	148***	1	7441***	36077***	6***	20***
Tempo arm.	3	305899***	552506***	120***	7***	1	48366***	25265***	269***	13***
Loc:Cul	135	2112***	2142***	2***	2***	81	680***	785***	5***	10***
Loc:Cond	5	1328***	2149***	8***	25***	3	1779***	6808***	20***	64***
Cul:Cond	27	193***	111***	1***	2***	27	133***	178***	1***	3***
Loc:Tempo	15	6273***	8101***	9***	6***	3	14026***	7721***	31***	58***
Cul:Tempo	81	1407***	1363***	124***	21***	27	360***	249***	1***	2***
Cond:Tempo	3	26014***	67690***	0,5***	2***	1	15274***	18471***	43***	30***
Loc:Cul:Cond	135	98***	119***	0,6***	1***	81	88***	135***	1***	1***
Loc:Cul:Tempo	405	387***	430***	2***	2***	81	262***	208***	1***	1***
Loc:Cond:Tempo	15	818***	1471***	0,3***	1***	3	2009***	5826***	32***	48***
Cul:Cond:Tempo	81	130***	191***	0,2***	1***	27	195***	128***	1***	2***
Loc:Cul:Cond:Tempo	405	115***	214***	0,2***	0,4***	81	99***	105***	1***	1***
Erro	4032	-	-	-	-	3136	-	-	-	-
Total	5375	-	-	-	-	3583	-	-	-	-
CV %	-	24,95	32,73	6,06	4,67	-	12,92	16,44	7,99	5,61

Nota: CV%: Coeficiente de variação; FV: Fator de variação; GER: germinação; EA: envelhecimento acelerado; PRO: proteína; LOC: local; Cul: cultivares; Cond.: Condição de armazenamento; *, **, *: significativo a 5, 1 e 0,01% de probabilidade de erro pelo teste F respectivamente.**

Fonte: Autoria própria (2021)

Os coeficientes de variação e a equação das figuras de regressão (Figura 12, 13, 14 e 15) para as variáveis germinação (GER), envelhecimento acelerado (EA),

proteína (PRO) e óleo (OLEO), conduzidas em ambientes de baixa e alta altitude, nas condições de armazenamento em barracão (BAR) e câmara fria (CF) para ambas as safras de cultivo (2017/2018 e 2018/2019), são apresentadas na Tabela 8. Para todas as variáveis analisadas, o modelo mais ajustado foi o linear.

O coeficiente de variação apresentou significância para as variáveis GER, EA e OLEO para ambas as condições de armazenamento (CF e BAR), tanto para os ambientes de produção (alta e baixa altitude), quanto para as safras de cultivo (2017/2018 e 2018/2019). As sementes produzidas em baixa altitude não apresentaram diferença estatística ao longo do tempo de armazenamento ($R^2 = 0,001ns$) (Tabela 8) - Com exceção para OLEO CF1 (sementes armazenadas em CF da safra 2017/2018). Além disso, o conteúdo de PRO das sementes, independente do ambiente de produção (alta e baixa altitude) e da condição de armazenamento (BAR e CF), não apresentaram mudanças ao longo do tempo (Tabela 8).

Tabela 8 - Equações, coeficientes de variação (R^2), % dia⁻¹ e % Total, da figura de regressão de germinação, envelhecimento acelerado, conteúdo de óleo e de proteína das sementes

Variáveis	Baixa altitude				Alta altitude			
	Equação	R^2	% dia ⁻¹	Total	Equação	R^2	% dia ⁻¹	Total
GER BAR1	$y = -0,2686x + 98,65$	0,63***	-0,27	-48,6	$y = -0,2001x + 97,01$	0,67***	-0,2	-36,0
GER BAR2	$y = -0,1403x + 94,79$	0,50***	-0,15	-27,0	$y = -0,0308x + 97,14$	0,16***	-0,03	-5,4
GER CF1	$y = -0,1544x + 96,17$	0,45***	-0,16	-28,8	$y = -0,1100x + 97,74$	0,55***	-0,11	-19,8
GER CF2	$y = -0,0604x + 91,68$	0,29***	-0,07	-12,6	$y = -0,0124x + 90,94$	0,04**	0,01	1,8
EA BAR1	$y = -0,3722x + 100,25$	0,72***	-0,37	-66,6	$y = -0,2724x + 97,76$	0,69***	-0,27	-48,6
EA BAR2	$y = -0,1845x + 93,00$	0,51***	-0,18	-32,4	$y = -0,0245x + 90,53$	0,07**	-0,02	-3,6
EA CF1	$y = -0,1897x + 95,70$	0,50***	-0,19	-34,2	$y = -0,1305x + 97,69$	0,53***	-0,14	-25,2
EA CF2	$y = -0,0168x + 86,99$	0,03 ^{ns}	-0,02	-	$y = 0,0144x + 97,65$	0,05*	0,02	2,88
OLEO BAR1	$y = 0,0089x + 20,65$	0,38***	0,04	7,74	$y = 0,0049x + 97,96$	0,16***	0,02	4,32
OLEO BAR2	$y = -0,0048x + 23,47$	0,08**	-0,02	-3,6	$y = -0,0056x + 97,41$	0,19***	-0,003	-0,47
OLEO CF1	$y = -0,0003x + 20,72$	0,00 ^{ns}	-0,00	-	$y = -0,0038x + 97,99$	0,09***	-0,02	-3,42
OLEO CF2	$y = -0,005x + 23,53$	0,14***	-0,02	-3,78	$y = -0,009x + 97,49$	0,37***	-0,004	-0,74
PRO BAR1	$y = 0,0031x + 35,03$	0,03 ^{ns}	0,01	-	$y = 0,0017x + 97,42$	0,01 ^{ns}	0,00	-
PRO BAR2	$y = 0,0048x + 37,47$	0,06 ^{ns}	0,01	-	$y = 0,0011x + 97,21$	0,01 ^{ns}	0,00	-
PRO CF1	$y = -0,0002x + 34,89$	0,00 ^{ns}	-0,00	-	$y = -0,0011x + 97,37$	0,00 ^{ns}	-0,00	-
PRO CF2	$y = 0,0004x + 37,26$	0,00 ^{ns}	0,00	-	$y = 0,0006x + 97,52$	0,00 ^{ns}	0,00	-

Fonte: Autoria própria (2021)

Em geral, a germinação (GER) e o envelhecimento acelerado (EA) decresceram com o tempo de armazenamento e a redução fica mais evidenciada a partir dos 60 dias (Figura 12, 13). Deste modo, para as sementes de soja, ambientes de armazenamento com condições de menor temperatura e de controle de umidade, resultam em garantia da qualidade fisiológica, quando comparados a ambientes de armazenamento sem controle.

A germinação (GER) das sementes produzidas na região Baixa e na região Alta nas duas safras avaliadas (2017/2018 e 2018/2019) durante o tempo de 0 dias,

apresentaram valores acima de 90% (Figura 12). Independentemente do local de produção de sementes (alta e baixa altitude) e da condição de armazenamento (BAR e CF), as sementes de soja apresentaram redução nos percentuais de germinação ao longo do tempo (Figura 12; Tabela 8).

É possível observar que as sementes armazenadas em CF apresentam menor redução de GER quando comparada às sementes armazenadas em BAR. Para a safra 2017/2018, o armazenamento em barracão (BAR) ocasionou uma redução na qualidade fisiológica de $-0,27\%$ e $-0,20\%$ dia^{-1} , em sementes produzidas nos ambientes de alta e de baixa altitude, respectivamente. Em contrapartida, as sementes quando armazenadas em câmara fria (CF), apresentaram redução menos acentuada ($-0,16\%$ e $-0,11\%$ dia^{-1} , baixa e alta altitude, respectivamente). Reduções na qualidade fisiológica foram observadas na safra 2018/2019, para ambas as condições de armazenamento, sendo de $-0,15\%$ e $-0,03\%$ dia^{-1} , para baixa e alta altitude, respectivamente em BAR e $-0,07\%$ e $0,01\%$ dia^{-1} , para baixa e alta altitude em CF.

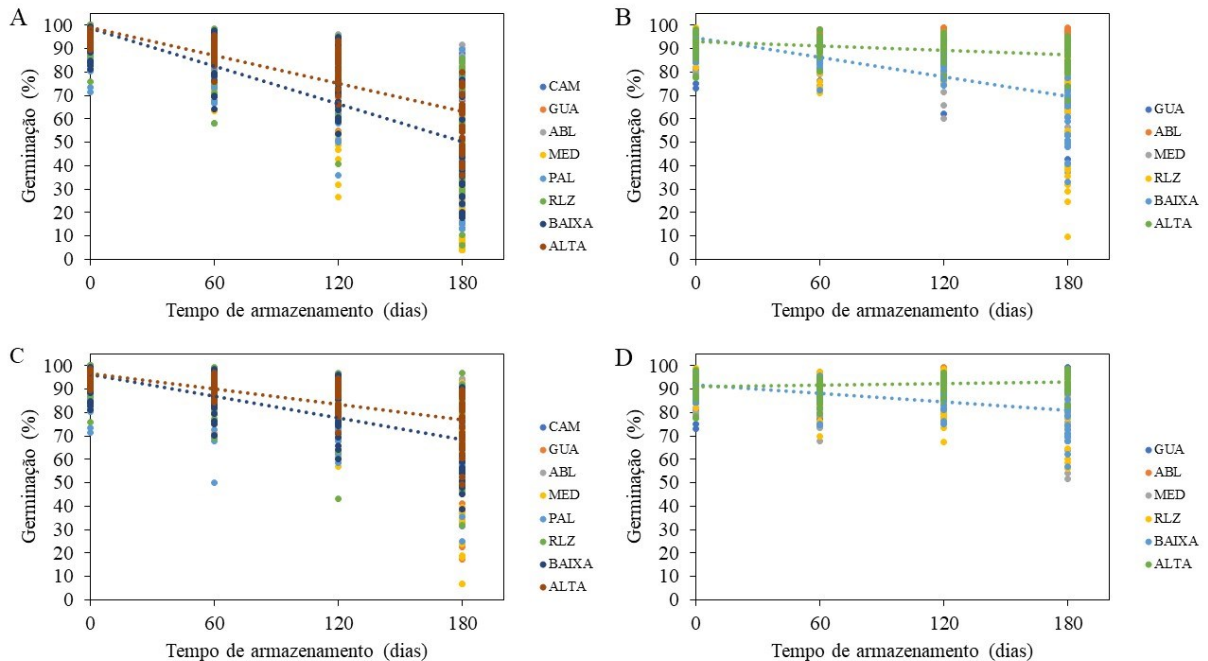
Dentre as regiões de produção de sementes, a de alta altitude apresentou maior potencial para produção de sementes, com menor percentual de redução ao final do tempo de armazenamento para germinação em ambas as condições de armazenamento BAR (-36% ; 2017/18 e $-5,4\%$; 2018/19) e CF ($-19,8\%$; 2017/18 e $1,8\%$; 2018/19) comparativamente ao ambiente de baixa altitude, no qual a queda na germinação foi mais acentuada em ambas as condições de armazenamento BAR ($-48,6\%$; 2017/18 e -27% ; 2018/19) e CF ($-28,8\%$; 2017/18 e $-12,6\%$; 2018/19) (Figura 12; Tabela 8).

Ao final dos 180 dias, na condição de barracão e independente do ambiente de produção, a germinação teve um percentual de redução elevado, comprometendo o uso dessas sementes (Tabela 8; Figura 12). Isso indica que o local de produção e de armazenamento influenciam nas propriedades fisiológicas da semente de soja. Também, se observou redução no potencial germinativo das cultivares na condição de câmara fria, todavia menos acentuada, quando comparada ao barracão (Tabela 8).

O vigor das sementes armazenadas em BAR e CF no decorrer do tempo de armazenamento, para as safras 2017/2018 e 2018/2019 é apresentado na Figura 13. Os resultados para o teste de envelhecimento acelerado (EA) mostram redução significativa no vigor das sementes de soja ao longo do período de armazenamento, independente da região de produção e da condição de armazenamento (Figura 13).

O vigor das sementes armazenadas em BAR apresentou redução maior ($-0,37\%$ e $-0,27\%$ dia^{-1} , para sementes produzidas em baixa e alta altitude, respectivamente), comparativamente às sementes armazenadas em CF ($-0,19\%$ e $-0,14\%$ dia^{-1} , para baixa e alta altitude, respectivamente), para safra 2017/2018.

Figura 12 - Germinação (%) das sementes ao longo do tempo de armazenamento (0, 60, 120 e 180 dias), nas safras 2017/18 A, C) e 2018/19 B, D), em condições de barracão A, B) e câmara fria C, D)



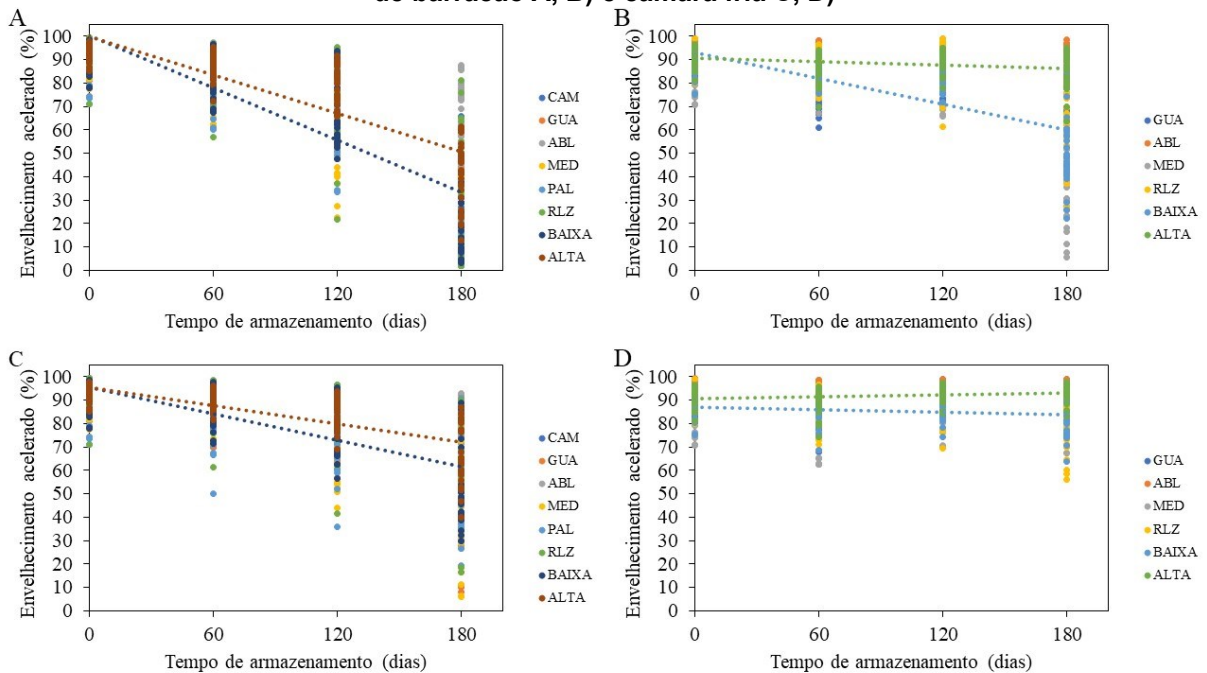
Fonte: Autoria própria (2021)

O mesmo ocorreu para a safra 2018/2019, onde sementes armazenadas em BAR apresentaram redução no vigor das sementes de $-0,18\%$ e $-0,02\%$ dia^{-1} , para baixa e alta altitude, respectivamente. Em CF, foi observada a redução do vigor apenas para sementes produzidas em alta altitude ($-0,19\%$ dia^{-1}). Para baixa altitude, as sementes armazenadas em CF não apresentaram diferença no vigor ao longo do tempo de armazenamento (Figura 13d; Tabela 8). Sementes armazenadas em CF ($-34,2\%$ e $-25,2\%$; $-0,01\%$ ns e $2,88\%$, para baixa e alta altitude na safra 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente), apresentam menor taxa de redução do vigor, ao final do tempo de armazenamento, independente do ambiente de produção comparado ao armazenamento em BAR ($-66,6\%$ e $-48,6\%$; $-32,4\%$ e $-3,6\%$, para baixa e alta altitude na safra 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente).

Sementes produzidas na região de alta altitude perdem vigor a uma taxa menor ao longo do tempo de armazenamento, quando comparadas às sementes

produzidas na região de baixa altitude, independente da condição de armazenamento e da safra produzida (Tabela 8; Figura 13 c, d). Sementes oriundas de regiões de baixa altitude apresentam queda acentuada do vigor ao longo do tempo de armazenamento, principalmente quando armazenadas em BAR, com reduções de -66,6% e de -32,4%, para safra 2017/2018 e 2018/2019 (Figura 13a, b). Os resultados corroboraram com os de Balesevic-Tubic *et al.* (2010) que observaram que a germinação da soja, declinou mais em sementes armazenadas em armazéns convencionais, permanecendo abaixo de 80%, devido à variabilidade de temperatura e de umidade, do que em ambiente controlado, após 180 dias de armazenamento.

Figura 13 - Médias de envelhecimento acelerado das sementes ao longo do tempo de armazenamento (0, 60, 120 e 180 dias), nas safras 2017/18 A, C) e 2018/19 B, D), em condições de barracão A, B) e câmara fria C, D)



Fonte: Autoria própria (2021)

Observando a média de perda diária de vigor nos dois anos de avaliação para sementes produzidas na região de baixa altitude armazenadas em BAR e CF, podemos inferir que um lote de sementes com vigor inicial de 98% pode ser armazenado por um período de 50 e 125 dias respectivamente até seu vigor baixar para 85%, que é o limite mínimo para que possa ser comercializado. Realizando a mesma analogia para sementes produzidas na região de Alta altitude armazenadas em BAR e CF, podemos inferir que um lote de sementes com vigor inicial de 98% pode ser armazenado por um período de 90 e 185 dias respectivamente. Com esses

dados podemos auxiliar empresas de produção de sementes a gerar um calendário de produção, identificando de acordo com suas áreas produção (altitude) e local de armazenamento qual a melhor data de plantio para que a semente não ultrapasse o período de armazenamento o qual seu vigor vai estar abaixo de 85%.

Observou-se o comportamento distinto para o teor de óleo (OLEO) durante o armazenamento em BAR e CF, entre as safras 2017/2018 e 2018/2019 e entre os ambientes de produção de sementes (alta e baixa altitude). Observa-se que no ambiente de baixa altitude apresentam-se maiores teores de óleo, comparativamente aos ambientes de alta altitude. Além disso, apresentam uma menor variação nos teores de óleo durante o tempo de armazenamento quando comparado a ambientes de alta altitude, que apresentam taxas maiores de variação (Figura 14).

Houve aumento significativo do teor de óleo ($0,04\% \text{ dia}^{-1}$) durante o período de armazenamento para sementes produzidas na região de baixa altitude na safra 2017/2018, armazenadas em BAR. O mesmo foi observado para o ambiente de alta altitude com acréscimo de $0,02\% \text{ dia}^{-1}$. Já na safra seguinte (2018/2019), os teores de óleo apresentaram redução durante o período de armazenamento em BAR ($-0,02\%$ e $-0,003\% \text{ dia}^{-1}$, para baixa e alta altitude, respectivamente).

Na safra 2017/2018, não foi observada influência do armazenamento em CF sobre o teor de óleo, para sementes produzidas em ambientes de baixa altitude ($-0,001\%$ ns). Contudo, para sementes produzidas em locais de alta altitude e armazenadas em CF, houve uma redução no conteúdo de óleo de $-0,02\% \text{ dia}^{-1}$. Ao final do tempo de armazenamento em CF, na safra 2018/2019, para ambos os ambientes de produção de sementes, ocorreu decréscimo no conteúdo de óleo de $-3,78\%$ e de $-0,74\%$, para baixa e alta altitude, respectivamente.

Em relação ao conteúdo de óleo, Sharma, Gambhir e Munshi (2005; 2006) relataram uma diminuição no teor em sementes de soja armazenadas em diferentes embalagens e temperaturas de armazenamentos. Resultados semelhantes foram obtidos neste estudo, com exceção da condição barracão na safra 2017/2018, as demais apresentaram redução no conteúdo de óleo em ambas as condições.

O aumento nos triacilgliceróis durante o período de armazenamento em sementes de soja, pode estar atrelado a diminuição do conteúdo de fosfolipídios, glicolipídios e esteróis, possivelmente desencadeados pela ruptura da membrana (SHARMA *et al.*, 2005; SHARMA *et al.*, 2006; SHARMA *et al.*, 2013; TIECKER JUNIOR *et al.*, 2014). Outros estudos identificaram que cultivares com maior teor de

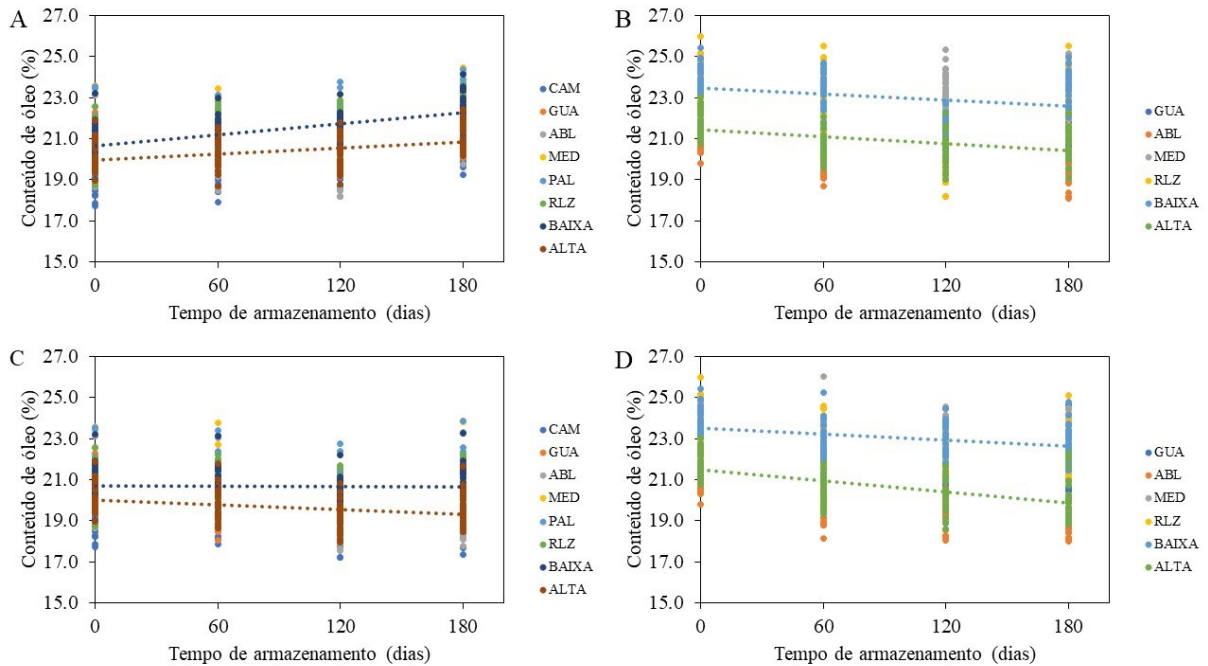
óleo tem um aumento da peroxidação lipídica durante o armazenamento (SHARMA; GAMBHIR; MUNSHI, 2005; SHARMA; GAMBHIR; MUNSHI, 2006; ZHANG; KIRKHAM, 1996; BALESEVIC-TUBIC *et al.*, 2005), proporcionando uma menor qualidade fisiológica após o armazenamento.

As espécies reativas de oxigênio (EROs) se originam como subprodutos do metabolismo fotossintético em resposta aos estresses bióticos e abióticos. As EROs são átomos que possuem um ou mais elétrons não pareados na sua órbita externa, sendo o peróxido de hidrogênio (H₂O₂) o mais prejudicial por possuir alta capacidade oxidativa, e é de fácil difusão entre membranas, podendo atingir moléculas distantes de sua origem (DELARMELO-FERRARESI *et al.*, 2014). As EROs ocasionam o início da peroxidação de lipídios, o avanço da degradação de membranas e posterior morte celular. Durante o processo de envelhecimento celular vegetal ocorre aumento na concentração de EROs endógena o que leva a uma série de mudanças fisiológicas causadas pelo estresse oxidativo, sendo uma das principais causas da perda de vigor (PONQUETT; SMITH; ROSS, 1992; SHARMA *et al.*, 2013).

Sharma *et al.* (2013) identificaram que a diminuição do teor de lipídios e o aumento dos ácidos graxos livres devido a hidrólise lipídica em sementes de soja durante o armazenamento até 180 dias, coincidiu com o aumento da peroxidação lipídica. Assim, em sementes oleaginosas como a soja e o girassol, a autooxidação de lipídios e o aumento no conteúdo de ácidos graxos livres durante o armazenamento são as principais razões para a rápida deterioração das sementes (BALESEVIC-TUBIC *et al.*, 2005).

Nesse sentido, a menor qualidade fisiológica (germinação e vigor), observadas na safra 2017/2018, em ambas as condições, podem estar atreladas ao maior conteúdo de óleo, excesso de precipitação de chuva no período de enchimento de grãos causando algum estresse a planta e por consequência maior atividade das EROs. Além disso, a estimativa do aumento ou da diminuição do teor de lipídios durante o armazenamento de sementes também depende do método de determinação utilizado, do grupo de genótipos, local e do ano de produção das sementes no período de armazenamento estudado (PRADO *et al.*, 2020).

Figura 14 - Médias de conteúdo de óleo das sementes ao longo do tempo de armazenamento (0, 60, 120 e 180 dias), nas safras 2017/18 A, C) e 2018/19 B, D), em condições de barracão A, B) e câmara fria C, D)



Fonte: Autoria própria (2021)

O teor de proteína (PROT) não apresentou diferença significativa entre os tempos de armazenamento avaliados e a condição a qual foi armazenada (CF e BAR) (Tabela 8; Figura 15). Contudo, é possível observar, que para ambas as safras 2017/2018 e 2018/2019, independente da condição de armazenamento, as sementes produzidas em ambientes de alta altitude apresentaram teores de proteína mais elevados quando comparados aos ambientes de produção de baixa altitude.

Vale destacar que, não foi observado a influência do tempo e local de armazenamento sobre o teor de proteína, independente do ambiente de produção.

5.4 Conclusões

As sementes de soja produzidas na região de alta altitude (acima 800m) apresentam maior manutenção da qualidade fisiológica (-15,7% germinação; -20,0% vigor; média dois anos), comparativamente a região de baixa altitude (-29,1% germinação; -33,3% vigor; média dois anos), independente da safra avaliada e da condição de armazenamento após os 180 dias de armazenamento.

A condição de câmara fria (-15,7% germinação; - 15,5 vigor; média dois anos alta e baixa), garante maior qualidade fisiológica das sementes ao longo do tempo de

armazenamento, comparadas as sementes armazenadas em barracão (-29,2% germinação; -38,2 vigor; média dois anos alta e baixa).

O teor de óleo não apresentou padrão de comportamento (aumentou e diminuiu) nos diferentes anos, locais e condições de armazenamento. O teor de proteína não é influenciado pelo armazenamento.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados evidenciam que o ambiente de cultivo implica diretamente sobre a composição química das sementes de soja.

Ambientes de ALTA altitude produzem sementes de soja com maior concentração de proteína, e os de BAIXA produzem sementes com maior concentração de óleo.

Sementes com maior concentração de proteína apresentam potencial fisiológico superior, e o teor de óleo foi negativamente associado com o potencial fisiológico.

O conteúdo do ácido graxo saturado palmítico correlacionou-se positivamente com o potencial fisiológico das sementes de soja.

Ambientes de elevadas altitudes maximizam a qualidade fisiológica das sementes de soja comparativamente a região de baixas altitudes, independente da safra avaliada e da condição de armazenamento.

Ao longo do tempo de armazenamento, as sementes armazenadas em barracão apresentaram maior decréscimo na qualidade fisiológica em relação a câmara fria.

O teor de óleo não apresentou padrão de comportamento nos diferentes anos, locais e condições de armazenamento. O teor de proteína não é influenciado pelo armazenamento.

Atrelar genética à população alvo de ambientes é uma via que garante qualidade da semente, beneficiando toda a cadeia produtiva da soja.

Associações entre ambientes e composição química da semente resultam em informações valiosas para desenvolver e direcionar estratégias de melhoramento, recomendar cultivares e ambientes de produção, a fim de suprir a demanda do mercado de óleo e de proteína.

REFERÊNCIAS

- ABDELGHANY, A.M., *et al.* Profiling of seed fatty acid composition in 1025 Chinese soybean accessions from diverse ecoregions. **The Crop Journal**, v. 8, p. 635–644, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.11.002>.
- AKOND, A.G.M. *et al.* Quantitative trait loci associated with moisture, protein, and oil content in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. **Journal Of Agricultural Science**, v.4, p.16-25, 2012.
- ALBRECHT, L.P. *et al.* Teores de óleo, proteínas e produtividade de soja em função da antecipação da semeadura na região oeste do Paraná. **Bragantia**, v. 67, n.4, p. 865-873, 2008.
- ALENCAR, E. R. de *et al.* Qualidade dos sementes de soja armazenados em diferentes condições. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v.13, n.5, p.606-613, 2009.
- ALMEIDA, F. A. C. *et al.* Estudo de técnicas para o armazenamento de cinco oleaginosas em condições ambientais e criogênicas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 189-202, 2010. Disponível em: <http://www.deaq.ufcg.edu.br/rbpa/rev122/Art1220.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- ALSAJRI, F. A. *et al.* Developing functional relationships between temperature and soybean yield and seed quality. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 1, p. 194-204, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20034>.
- ALT, J.L. *et al.* Phenotypic and molecular analysis of oleate content in the mutant soybean line M23. **Crop Science**. v. 45, p. 1997–2000, 2005.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDA, A. *et al.* Yield features of two soybean varieties under different water supplies and field conditions. **Field Crops Research**, v. 245, 2020. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107673>.
- ASSEFA, Y. *et al.* Analysis of Long Term Study Indicates Both Agronomic Optimal Plant Density and Increase Maize Yield per Plant Contributed to Yield Gain. **Scientific Report**, v. 8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23362-x>.
- ASSEFA, Y. *et al.* Assessing Variation in US Soybean Seed Composition (Protein and Oil). **Frontiers in Plant Science**. v. 10. 2019. DOI:<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00298>.
- AZAM, M. *et al.* Profiling and associations of seed nutritional characteristics in Chinese and USA soybean cultivars. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 98, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103803>.
- AZEVEDO, M. R. Q. A. *et al.* Influência das embalagens e condições de armazenamento no vigor de sementes de gergelim. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 519-524, 2003.

Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v7n3/v7n3a19.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2021.

BACHLAVA, E. *et al.* Heritability of oleic acid content in soybean seed oil and its genetic correlation with fatty acid and agronomics traits; **Crop Science**. v. 48, p. 1764–1772, 2008.

BAGATELI, J.R. *et al.* Vigor de sementes e densidade populacional: reflexos na morfologia de plantas e produtividade da soja. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, p. 38686–38718, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-422>.

BALESEVIC-TUBIC, S. *et al.* Influence of ageing process on biochemical changes in sunflower seeds. **Helia**, v. 28, p. 107–114, 2005.

BALEŠEVIC-TUBIC, S. *et al.* Seed viability of oil crops depending on storage conditions. **Helia**, v. 33, n. 52, p. 153–160, 2010.

BANDILLO, N. *et al.* A population structure and genome-wide association analysis on the USDA soybean germplasm collection. **Plant Genome**, v. 8, p. 1–13, 2015.

BELLALOU, N. *et al.* Elevated Atmospheric Carbon Dioxide and Temperature Affect Seed Composition, Mineral Nutrition, and 15N and 13C Dynamics in Soybean Genotypes under Controlled Environments. **Atlas Journal Plant Biology**, p. 56–65, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5147/ajpb.v0i0>.

BELLALOU, N., MENGISTU, A.; KASSEM, M. A. Effects of Genetics and Environment on Fatty Acid Stability in Soybean Seed. **Food and Nutrition Sciences**, v. 4, p. 165–175, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4236/fns.2013.49A1024>.

BELLALOU, N. *et al.* Effects of Maturity, Genotypic Background, and Temperature on Seed Mineral Composition in Near-Isogenic Soybean Lines in the Early Soybean Production System. **Crop Science**, v. 51, p. 1161–1171, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2010>.

BELLALOU, N. *et al.* Evaluation of Exotically-Derived Soybean Breeding Lines for Seed Yield, Germination, Damage, and Composition under Dryland Production in the Midsouthern USA. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls>.

BELLALOU, N. *et al.* Agricultural practices altered soybean seed protein, oil, fatty acids, sugar s, and minerals in the Midsouth USA; **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. 31, 2015.

BELLALOU, N.; SMITH, J. R.; MENGISTU, A. Seed nutrition and quality, seed coat boron and lignin are influenced by delayed harvest in exotically-derived soybean breeding lines under high heat. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1563, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01563>

BELTRÃO, N. D. M.; de OLIVEIRA, M. I. P. **Biossíntese e degradação de Lipídios, Carboidratos e Proteínas em oleaginosas**. Embrapa Algodão-Documentos (INFOTECA-E). 2007.

BIODIESEL FAQ's; Jefferson City: **National Biodiesel Board**. 2015. Disponível em: <http://biodiesel.org/what-is-biodiesel/biodiesel-faq's>. Acesso em: 18 jan. 2021.

BONATO, E. R. *et al.* Teor de óleo e de proteína em genótipos de soja desenvolvidos após 1990. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 12, p. 2391-23198, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária, 2009.

BRUNO, J. L. *et al.* Acúmulo de óleo em sementes de soja cultivadas in vitro e in vivo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 5, p. 3085-3090, 2015.

BRZOSTOWSKI, L. F.; DIERS, B.W. Agronomic Evaluation of a High Protein Allele from PI407788A on Chromosome 15 across Two Soybean Backgrounds. **Crop Science**, v. 57, p. 2972–2978, 2017.

DOI:<https://doi.org/10.2135/cropsci2017.02.0083>.

CALYXT, **Calyxt (NASDAQ: CLXT), based in Roseville, Minnesota is a plant-based technology company**. Calyxt's High Oleic Low Linolenic Soybean Deemed Non-Regulated by USDA. <https://calyxt.com/calyxts-high-oleic-low-linolenic-soybean-deemed-non-regulated-by-usda/>. Acesso em: 20 de maio de 2021.

CANTARELLI, L. D. *et al.* Physiological Seeds Quality: Spatial Distribution and Variability Among Soybean Plant Population. **Bioscience Journal Uberlândia**, v. 31, n. 2, p. 344-351, 2015.

CARDOSO, R. B.; BINOTTI, F. F. S.; CARDOSO, E. D. Potencial fisiológico de sementes de crambe em função de embalagens e armazenamento. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 272-278, 2012.

CARRERA, C. *et al.* Environmental variation and correlation of seed components in nontransgenic soybeans: protein, oil, unsaturated fatty acids, tocopherols, and isoflavones. **Crop Science**, v. 51, p. 800-809, 2011.

CARRERA, C.S. *et al.* Amino acid composition of soybean seeds as affected by climatic variables. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1579–1587, 2011.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001200001>.

CARVALHO, B. O. *et al.* Action of defense activator and foliar fungicide on the control of Asiatic rust and on yield and quality of soybean seeds. **Journal of Seed Science**, v. 35, n. 2, p. 198-206, 2013.

CARVALHO, N. M.; J. NAKAGAWA. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. Jaboticabal: Funep, 2012.

CARVER, B. F.; WILSON R. F.; BURTON, J. W.; Developmental changes in acyl-composition of soybean seed selected for high oleic acid concentration. **Crop Science**, v. 24, p. 1016-1019, 1984.

CHAUDHARY, J. *et al.* Expanding omics resources for improvement of soybean seed composition traits. **Frontiers Plant Science**, v. 6, 2015. DOI:

<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.0102>.

CHEBROLU, K. K. *et al.* Impact of heat stress during seed development on soybean seed metabolome. **Metabolomics**, v. 12, n. 28, 2016. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s11306-015-0941-1>

- CHOE, E.; MIN, D. B.; Mechanisms and Factors for Edible Oil Oxidation. **Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety**, v. 5, p. 169-186, jul. 2006.
- CHOI, D. H. *et al.* Phenology and seed yield performance of determinate soybean cultivars grown at elevated temperatures in a temperate region. **PLoS one**, v. 11, n. 11, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165977>.
- CHOWDHURY, R. *et al.* Association of dietary, circulating, and supplement fatty acids with coronary risk: a systematic review and meta-analysis. **Annual International Med**, v. 160, p. 398-406, 2014.
- CLEMENTE, E. T.; CAHOON, E. B.; Soybean Oil: Genetic Approaches for Modification of Functionality and Total Content. **Plant Physiology**, v. 151, p. 1030–1040, Nov. 2009.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **CONAB**: Acompanhamento da Safra Brasileira de Sementes Safra 2020/21. v. 8, n. 7, Abr. 2021.
- CORADI, P. C. *et al.* Technological and sustainable strategies for reducing losses and maintaining the quality of soybean grains in real production scale storage units. **Journal of Stored Products Research**, v. 87, p. 101624, 2020.
- CORADI, P. C. *et al.* Qualidade de sementes de soja armazenados em baixas temperaturas. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 9, n. 3, p. 197-208, 2015.
- CUNHA, J. P. A. R. da *et al.* Qualidade das sementes de soja após a colheita com dois tipos de colhedora e dois períodos de armazenamento. **Ciência Rural**, v. 39, p. 1420-1425, 2009.
- DELARMELINO-FERRARESI, L. M. *et al.* Desempenho fisiológico e composição química de sementes de soja. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 2014.
- DEMITO, A.; AFONSO, A. D. L. Qualidade das sementes de soja resfriadas artificialmente. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 17, n. 1, p. 7-14, 2009.
- DIERS, B. W. *et al.* RFLP analysis of soybean seed protein and oil content. **Theoretical Applied Genetics**, v. 83, p. 608–612, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00226905>.
- DJANAGUIRAMAN, M. *et al.* Soybean pollen anatomy, viability and pod set under high temperature stress, **Journal Agronomy Crop Science**, v. 199, p. 171–177, 2013.
- EBONE, L. A. *et al.* Soybean seed vigor: Uniformity and growth as key factors to improve yield. **Agronomy**, v. 10, n. 4, p. 545, 2020.
- EIRAS, D. L.; BIAGIONNI, M. A. M. Perda de matéria seca em sementes de milho submetidos a sistemas de secagem natural e artificial. **Revista Energia na Agricultura**, v. 29, n.3, p. 228-235, Jul.-Set., 2014.

- EMER, A. A *et al.* Composição bioquímica e vigor de sementes de soja sob diferentes condições de envelhecimento acelerado. Guarapuava- PR. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 8, n. 3, p. 07-15, 2015.
- ERHAN, S. V. Industrial uses of vegetable oils. Champaign: **AOCS Press**, 2005.
- EVANGELISTA, J. S. P. C. *et al.* Soybean productivity, stability, and adaptability through mixed model methodology. **Ciência Rural**, v. 51, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200406>.
- FAO, **Food and Agriculture Organization**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Acesso em: 08 set. 2020.
- FARHOOSH, R.; EINAFSHAR, S.; SHARAYEI, P.; The effect of commercial refining steps on the rancidity measures of soybean and canola oils. **Food Chemistry**, v. 115, n. 3, p. 933-938, 2009.
- FARNO, L. A. Oil and fatty acid profiles of soybeans. **Graduate College of the Oklahoma State University**, 2005.
- FEHR, W. R., CAVINESS, C. E. Stages of Soybean Development. **Special Report 80**. Iowa, 1977.
- FEHR, W. R. Breeding for modified fatty acid composition in soybean. **Crop Science**, v. 47, p.72-87, 2007.
- FELICETI, M. L. *et al.* Grupos de maturidade relativa frente à qualidade fisiológica das sementes de soja. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 27410-27421, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-260>.
- 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, p. 3066-3077, 2016.
- FERRAREZI, D. *et al.* Desempenho fisiológico e composição química de sementes de soja; **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 1, p. 14-18, 2014.
- FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja–taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, v. 28, p. 19-23, 2005.
- FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portuguese)**. R package version 1.2.0, 2018.
- FINCH-SAVAGE, W. E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, 567–591, 2016.
- FINOTO, E. L. *et al.* Antecipação e retardamento de colheita nos teores de óleo e proteína das sementes de soja, cultivar Valiosa RR; **Scientia Agropecuaria**, v. 8, n. 2, p. 99 – 107, 2017.
- FRANÇA-NETO, J. B. *et al.* Tecnologia da produção de soja de alta qualidade. **Documentos 380**, Embrapa Soja-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2010.

FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E.; AGUIAR, A.V. Relação entre altitude e temperatura: uma contribuição ao zoneamento climático no estado do Paraná. **Revista de estudos e elementos**, v. 10, n. 1, p. 49-64, jan./jun. 2008.

FURQUIM, L.C. *et al.* Efeito da secagem e do armazenamento das sementes de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) na qualidade do óleo. **Revista Científica**, v. 1, n. 1, p. 51-70, 2014.

GHASSEMI-GOLEZANI, K. *et al.* Physiological quality of soybean seeds affected by water and light deficits. **Journal of Plant Physiology and Breeding**, v. 5, p. 11–18, 2015.

GIBSON, L. R.; MULLEN, R.E. Soybean Seed Composition Under High Day and Night Growth Temperatures. **Ibid**, p. 733–737, 1996.

GONÇALVES, C. A. *et al.* Influência da temperatura no acúmulo de proteínas em sementes de soja. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, p. 1038-1040, jul. 2007.

GUNASEKERA, C. P. *et al.* Genotype by environment interactions of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) and canola (*Brassica napus* L.) in Mediterranean-type environments: II. Oil and protein concentrations in seed. **European Journal Agriculture**, v.25, p. 13-21, 2006.

GUNSTONE, F. D. **Vegetable Oils**. In: SHAHIDI, Fereidoon. *Bailey's Industrial Oil & Fat Products: Edible Oil & Fat Products Chemistry, Properties & Health Effects*. 6. ed. New Jersey: Wiley Interscience, v.1. Cap. 6, p. 213-268, 2005.

HAMMOND, E. G. *et al.* **Soybean Oil**. In: SHAHIDI, F. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products: Edible Oils*. 6. ed. v. 2. Cap. 13. EUA: Wiley-interscience, 2005.

HAN, C.; YANG, P. Studies on the molecular mechanisms of seed germination. **Proteomics**, v. 15, p. 1671–1679, 2015.
DOI:<https://doi.org/10.1002/pmic.201400375>.

HARTMANN - FILHO, C. P. *et al.* The effect of drying temperatures and storage of seeds on the growth of soybean seedlings. **Journal of Seed Science**, v. 38, p. 287–295, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v38n4161866>.

HEMINGWAY, J.; ESKANDARI, M.; RAJCAN, I.; Genetic and environmental effects on fatty acid composition in soybeans with potential use in the automotive industry. **Crop Science**, v. 55, p. 658-668, 2015.

HOSOI, T.; KAN, K. Natto: A soybean food made by fermenting cooked soybeans with bacillus subtilis (natto). In: **Farnworth ER (ed) Handbook of fermented functional foods**, CRC Press, Boca Raton, p. 267–290, 2008.

HOSSAIN, Z. *et al.* Comparative analysis of oil and protein content and seed yield of five Brassicaceae oilseeds on the Canadian prairie. **Industrial Crops Products**, v. 136, p. 77–86, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.001>.

HOU, G. *et al.* Environmental effects on fatty acid levels in soybean seed oil. **Journal of the American Oil Chemists Society**, Urbana, v. 83, n. 9, p. 759-763, set. 2006.

HU, M.; WIATRAK, P.; Effect of planting date on soybean growth, yield, and grain quality: Review. **Agronomy Journal**, v. 104, p. 785-790, 2012.

HUNTER, J. E.; ZHANG, J.; KRIS-ETHERTON, P. M. Cardiovascular disease risk of dietary stearic acid compared with trans, other saturated, and unsaturated fatty acids: asystematic review. **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 91, n. 1, p. 46 – 63, 2009.

IBÁÑEZ, M. A. Chemical composition, protein quality and nutritive value of commercial soybean meals produced from beans from different countries: A meta-analytical study. Anim. **Feed Science Technology**, v. 267, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114531>.

IQBAL, Z. *et al.* Genetic diversity of soybean accessions using seed storage proteins. **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, v. 47, n. 1, p. 203-209, 2015.

JUMRANI, K., BHATIA, V. S. Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 24, p. 37–50, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0480-5>.

JUVINO, A. N. K. **Qualidade fisiológica das sementes de soja durante o beneficiamento e o armazenamento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias – Agronomia) Programa de pós-graduação do instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde – GO, 2013.

JYOTI, U.; MALIK CP. Seed deterioration: A review. **International Journal of Life Sciences Biotechnology & Pharma Research**, Jaipur, v. 2, n. 3, p. 373-386, Jul. 2013.

KANDIL, A. A.; SHARIEF, A. E.; SHETEIWY, M. S. Effect of seed storage periods, conditions and materials on germination of some soybean seed cultivars. **American Journal of Experimental Agriculture**, v. 3, n. 4, p. 1020-1043, Out.-Dez. 2013.

KANE, M. V. *et al.* Early-Maturing Soybean Cropping System: III. Protein and Oil Contents and Oil Composition. **Agronomy Journal**, v. 89, p. 464–469, 1997. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1997.00021962008900030016x>.

KIM, M.; SCHULTZ, S.; NELSON, R. L.; DIERS, B. W.; Identification and fine mapping of a soybean seed protein QTL from PI 407788A on chromosome 15. **Crop Science** 56:219–225, 2016.

KNOTHE, G.; Biodiesel Derived from a Model Oil Enriched in Palmitoleic Acid, Macadamia Nut Oil. **Energy e Fuels**, Washington, v. 24, n.3, p. 2098-2103, fev. 2010.

KOLCHINSKI, E. M.; SCHUCH, L. O. B.; PESKE, S. T. Vigor de sementes e competição intra-específica em soja. **Ciência Rural**, v. 35, n. 6, p. 1248-1256, 2005.

KONDA, A. R. *et al.* Metabolic engineering of soybean seeds for enhanced vitamin E tocochromanol content and effects on oil antioxidant properties in polyunsaturated fatty acid-rich germplasm. **Metabolic Engineering**, v. 57, p. 63–73, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2019.10.005>.

- KRZYŻANOWSKI, F. C. K (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Abrates, 1999.
- LAMICHANEY, A.; MAITY, A. Implications of rising atmospheric carbon dioxide concentration on seed quality. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, p. 805–812, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02073-x>.
- LANNAL, A.C. *et al.* Effect of temperature on polyunsaturated fatty acid accumulation in soybean seeds. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 17, n.2, p. 213-222, abr./jun. 2005.
- LEITE, D. *et al.* Emissions and performance of a diesel engine affected by soybean, linseed, and crambe biodiesel. **Industrial Crops Products**, v. 130, p. 267–272, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.092>.
- LORINI, I.; MIKE, L. H.; SCUSSEL, V. M. **Armazenagem de sementes**. Campinas: Instituto Biogeneziz, v. 1, 1000 p. 2002.
- MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison, v. 2, n. 2, p. 176-77, 1962.
- MAHMOUD, A. A. *et al.* Effect of six decades of selective breeding on soybean protein composition and quality: a biochemical and molecular analysis. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 54, n. 11, p. 3916-3922, 2016.
- MANDARINO, J. M. G.; ROESSING, A. C. Tecnologia para a produção de óleo de soja: descrição das etapas equipamentos, produtos e subprodutos. Londrina: Embrapa Soja, **Embrapa Soja Documentos**, 2001.
- MARCOS FILHO, J.; KIKUTI, A. L. P.; LIMA, L. B. Métodos para avaliação do vigor de sementes de soja, incluindo a análise computadorizada de imagens. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 1, p. 102-112, 2009.
- MARQUEZ, M. C. **Adaptabilidade, estabilidade e diversidade genética de cultivares de soja em três épocas de semeadura em Uberlândia – MG**. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.
- MARTIN, N. Domestic soybean to compensate the European protein deficit: illusion or real market opportunity? 2015. DOI: <https://doi.org/10.1051/ocl/2015032>.
- MATEI, G. *et al.* Oil, protein and fatty acid profiles of Brazilian soybean cultivars in multi-environmental trials. **Australian Journal Crop Science**, v. 12, p. 686–698, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.05.PNE667>.
- MEDIC, J.; ATKINSON, C.; HURBURGH, C. R. J.; Current knowledge in soybean composition. **Journal Am Oil Chemical Soc**, v. 91, p. 363–384, 2014.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Cultivar Web - Registro nacional de cultivares - RNC. 2021. **Cultivar Web**. Disponível em: https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php. Acesso em: 12 maio 2021.

- MINUZZI, A. *et al.* Qualidade de sementes de quatro cultivares de soja, colhidas em dois locais no estado do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, p. 176-185, 2010.
- MINUZZI, A. *et al.* Rendimento, teores de óleo e proteínas de quatro cultivares de soja, produzidas em dois locais no estado do Mato Grosso do Sul. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, jul./ago. 2009.
- MOREANO, T. B. *et al.* Physical and physiological qualities of soybean seed as affected by processing and handling. **Journal of Seed Science**, v. 35, p. 466-477, 2013.
- MORRISON, M. J. *et al.* Changes in Isoflavone Concentration with 58 Years of Genetic Improvement of Short-Season Soybean Cultivars in Canada. **Crop Science**, v. 48, p. 2201-2208, 2008.
- MORRISON, M. J.; VOLDENG, H. D.; COBER, E. R. Agronomic Changes from 58 Years of Genetic Improvement of Short-Season Soybean Cultivars in Canada. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 780-784, 2000.
- MOURTZINIS, S. *et al.* Planting Date, Maturity, and Temperature Effects on Soybean Seed Yield and Composition. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 2040–2049, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.05.0247>.
- MOURYA, V. *et al.* Near-Infrared Reflectance spectroscopy for protein content in soybean flour and screening of germplasm across different countries. **Agronomy Research**, v. 5, p. 29-34, 2016.
- MUIR, W. E.; WHITE, N. D.G. **Microorganisms in stored grain**. In: Muir, W. E. (ed.) Manitoba: Grain Preservation Biosystems, 2000.
- NAEVE, S. L.; HUERD, S.C. Year, region, and temperature effects on the quality of Minnesota's soybean crop. **Agronomy Journal**, v. 100, p. 690-695, 2008.
- NAKAGAWA, A. C. S. *et al.* High temperature during soybean seed development differentially alters lipid and protein metabolism. **Plant Production Science**, v. 23, p. 504–512, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1742581>.
- NAKAGAWA, A. C. S. *et al.* Drought stress during soybean seed filling affects storage compounds through regulation of lipid and protein metabolism. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n. 111, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2683-y>.
- NAOE, A. M. L.; PELUZIO, J. M.; SOUSA, J. P. Estresse ambiental na cultura da soja. **Revista Integralização Universitária**, Palmas, v. 12, n. 16, jun. 2017.
- OECD/FAO. **Agricultural Outlook 2020-2029**, OECD Publishing, Paris/FAO, Rome, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1787/1112c23b-en>.
- OLIVA, M. L. *et al.* Stability of Fatty Acid Profile in Soybean Genotypes with Modified Seed Oil Composition. **Crop Science**, v. 46, p. 2069–2075, 2006. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.12.0474>.

- OLIVEIRA, K. R. *et al.* Physiological quality of soybean seeds grown under different low altitude field environments and storage time. **Plant, Soil and Environment**, v. 67, p. 92–98, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17221/512/2020-PSE>.
- OLIVEIRA, M. F. **Avaliação de cinco estratégias de amostragem para a obtenção da coleção nuclear de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)**. 2007. Tese (Doutorado em Agronomia: genética e melhoramento de plantas) – Escola superior de agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- OLIVEIRA, M. F. *et al.* Establish a soybean germplasm core collection. **Field Crops Research**, New York, v. 119, n. 2-3, p. 277-289, nov./dez. 2010.
- OLIVOTO, T.; LÚCIO, A. D. Metan: An R package for multi-environment trial analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 11, p. 783–789, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>.
- PAL, G. *et al.* An Economic Analysis of Pigeonpea Seed Production Technology and Its Adoption Behavior: Indian Context. **The Scientific World Journal**, p. 1–7, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/7973638>.
- PATIL, G. *et al.* Molecular mapping and genomics of soybean seed protein: a review and perspective for the future. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 130, p. 1975–1991, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-017-2955-8>.
- PEREIRA, M. D. *et al.* Physiological quality of physic nut (*Jatropha curcas* L.) seeds during storage. **Journal of Seed Science**, Londrina, v. 35, n. 1, p. 21-27, Jan.-Mar. 2013.
- PIPER, E. L.; BOOTE, K. I. Temperature and cultivar effects on soybean seed oil and protein concentrations. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 76, n. 10, p. 1233-1241, 1999.
- PÍPOLO, A. E.; SINCLAIR, T. R.; CAMARA, G. M. S. Effects of temperature on oil and protein concentration in soybean seeds cultured in vitro. **Annals of Applied Biology**, v. 144, p. 71-76, 2004.
- PÍPOLO, A. P. *et al.* Teores de óleo e proteína em soja: fatores envolvidos e qualidade para a indústria. **Comunicado Técnico 86**, Londrina-PR, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/130450/1/comunicado-tecnico-6OL.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2018.
- POETA, F., BORRÁS, L.; ROTUNDO, J. L. Variation in Seed Protein Concentration and Seed Size Affects Soybean Crop Growth and Development. **Crop Science**, v. 56, p. 3196–3208, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.01.0025>.
- PONQUETT, R. T.; SMITH, M. T.; ROSS, G. Lipid autooxidation and seed ageing; putative relationships between seed longevity and lipid stability. **Seed Science Research**, v. 2, p. 51–54, 1992.
- POPOVIC, V. *et al.* Variability and correlations between yield components of soybean *Glycine max* (L.) Merr. **Genetika**, v. 44, p. 33-45, 2012.

PRADO, P. M. C. *et al.* Propriedades fisiológicas e físico-químicas de semente de soja com tecnologia IPRO durante o armazenamento com e sem controle ambiental. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e86973898-e86973898, 2020.

PRENGER, E. M. *et al.* Introgression of a High Protein Allele into an Elite Soybean Cultivar Results in a High-Protein Near-Isogenic Line with Yield Parity. **Crop Science**, v. 59, p. 2498–2508, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.12.0767>.

QIAO, Y. *et al.* Elevated CO₂ and temperature increase grain oil concentration but their impacts on grain yield differ between soybean and maize grown in a temperate region. **Science Total Environment**, v. 666, p. 405–413, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.149>.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing website, 2020.

RAMOS, M. J. *et al.* Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. **Bioresource technology**, v. 100, n. 1, p. 261-268, 2009.

RAO, N. K.; DULLOO, M. E.; ENGELS, J. M. A review of factors that influence the production of quality seed for long-term conservation in genebanks. **Genetic resources and crop evolution**, v. 64, n. 5, p. 1061-1074, 2017.

RATHINAVEL, K. Influence of storage temperature and seed treatments on viability of cotton seed (*Gossypium hirsutum* L.). **Cotton Research Journal**, Nagpur, v.6, n.1. Jan.-Jun., 2014.

REN, C.; BILYEU, K. D.; BEUSELINCK, P. R. Composition, Vigor, and Proteome of Mature Soybean Seeds Developed under High Temperature. **Crop Science**, v. 49, p. 1010–1022, 2009. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.05.0247>.

ROLLETSCHEK, H. *et al.* Temperature-dependent endogenous oxygen concentration regulates microsomal oleate desaturase in developing sunflower seeds. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, p. 3171–3181, 2007.

ROTUNDO, J. L., MILLER-GARVIN, J. E., NAEVE, S. L. Regional and Temporal Variation in Soybean Seed Protein and Oil across the United States. **Crop Science**, v. 56, p. 797–808, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0394>.

ROTUNDO, J. L., WESTGATE, M.E. Meta-analysis of environmental effects on soybean seed composition. **Field Crops Research**, v. 110, p. 147–156, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.012>.

ROWNTREE, S. C. *et al.* Genetic Gain × Management Interactions in Soybean: I. Planting Date. **Crop Science**, v. 53, p. 1128-1138, 2013.

SALDIVAR, X. *et al.* Changes in chemical composition during soybean seed development. **Food Chemistry**, v. 124, p. 1369–1375, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.091>.

SANTOS, E. M. *et al.* Low linolenic soybeans for biodiesel: characteristics, performance and advantages. **Fuel**, v. 104, p. 861-864, 2013.

SARKAR, A. *et al.* Increasing the oxidative stability of soybean oil through fortification with antioxidants. **Journal of food science and technology**, v. 50, p. 666-673, 2015.

SEDIYAMA, T. **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina, 2009.

SCHEEREN, B. R. *et al.* Qualidade fisiológica e produtividade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 3, p. 35-41, 2010.

SIMEPAR, **Sistema Meteorológico do Paraná**. Disponível em: http://www.simepar.br/site_pw/faleconosco#collapse1. Acesso: abril, 2019.

SHARMA, S. *et al.* Positional effects on soybean seed composition during storage. **Journal of food science and technology**, v. 50, n. 2, p. 353-359, 2013.

SHARMA, S.; GAMBHIR, S.; MUNSHI, S. K. Effect of temperature on vigour and biochemical composition of soybean seed during storage. **Journal Research Punjab Agricultural University**, v. 41, p. 4–38, 2006.

SHARMA, S. *et al.* Changes in soluble sugar content and antioxidant enzymes in soybean seeds stored under different storage conditions. **Indian Journal of Agriculture Biochemical**, v. 18, p. 9–12, 2005.

SIERRA-CANTOR, J. F.; GUERRERO-FAJARDO, C. A. Methods for improving the cold flow properties of biodiesel with high saturated fatty acids content: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 774–790, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.077>.

SILVA, K. B. *et al.* Adaptability and stability of soybean cultivars for grain yield and seed quality. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, 2017. DOI:<https://doi.org/10.4238/gmr16029646>.

SINGER, S. D.; WESELAKE, R. J. Abiotic factors in fluecane plant storage lipid accumulation and composition. **Plant Science**, v. 243, p. 1 –9, 2016.

SINHA, R. N.; MUIR, W. E. Grain storage: part of a system. **Westport, Connecticut: The AVI Publishing Company**, Incorporated, 481p., 1973.

SNYDER, J. M.; MOUNTS, T. L. Analysis of vegetable oil volatiles by multiple headspace extraction. **Journal of The American Oil Chemists**, Peoria, v. 67, n. 11, p.800-804, 1990.

SONG, J. Y. *et al.* Evaluation of genetic diversity and comparison of biochemical traits of soybean (*Glycine max* L.) germplasm collections. **Plant Breed Biotechnology**, v. 4, p. 374- 384, 2013.

STANOJEVIC, S. P. *et al.* Assessment of soy genotype and processing method on quality of soybean tofu. **Journal Agriculture and Food Chemical**, v. 59, p. 7368-7376, 2011.

STOBAUGH, B. *et al.* Field evaluation and break-even analysis of specialty soybeans for biodiesel and meal protein production. **Journal Crop Improvement**, v. 32, p. 33–49, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/15427528.2017.1391916>.

STOBAUGH, B. *et al.* Agronomic evaluation of high-protein and high-oil soybean genotypes for specialty markets. **Journal Crop Improvement**, p. 1–14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/15427528.2017.1287807>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Trad.: Eliane R. Santarém et al., 3 ed., Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**, Artmed Editora, 2017.

TAMAGNO, S. *et al.* Dynamics of oil and fatty acid accumulation during seed development in historical soybean varieties. **Field Crops Research**, v. 248, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107719>.

TIECKER JUNIOR, A. *et al.* Qualidade físico-química de sementes de milho armazenados com diferentes umidades em ambientes hermético e não hermético. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 2, p. 174–186, 2014.

UMBURANAS, R. C. *et al.* Sowing Dates and Seeding Rates Affect Soybean Grain Composition. **International Journal of Plant and Productions**, v. 12, p. 181–189, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0018-y>.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **World Agricultural Production**, 2020. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2020.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **World Agricultural Production**, 2021. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. Acesso em: 10 out. 2021.

UPDAW, N. J., BULLOCK, J. B., NICHOLS, T. E. Pricing Soybeans on the Basis of Oil and Protein Content. **Journal of Agricultural Applied**, v. 8, p. 129–132, 1976.

VAN ITTERSUM, M. K. *et al.* Yield gap analysis with local to global relevance—a review. **Field Crops Research**, v. 143, p. 4–17, 2013.

VEIGA, A. D. *et al.* Influence of potassium and liming on chemical composition, physiological quality and enzyme activities of soybean seeds. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 4, p. 953-960, 2010.

VIRGOLINO, Z. Z. *et al.* Physiological quality of soybean seeds artificially cooled and stored in different packages. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 473-480, 2016.

VOLLMANN, J. *et al.* Environmental and genetic variation of soybean seed protein content under Central European growing conditions. **Journal Science Food Agriculture**, v. 80, p. 1300–1306, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(200007\)80:9<1300::AID-JSFA640>3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/1097-0010(200007)80:9<1300::AID-JSFA640>3.0.CO;2-I).

WANG, D. *et al.* Effects of Temperature and Moisture on Soil Organic Matter Decomposition Along Elevation Gradients on the Changbai Mountains, Northeast China. **Pedosphere**, v. 26, p. 399–407, 2016. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60052-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60052-2).

- WANG, J. *et al.* Primary metabolite contents are correlated with seed protein and oil traits in near-isogenic lines of soybean. **The Crop Journal**, v. 7, p. 651–659, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2019.04.002>.
- WATTAL, R. K.; SIDDIQUI, Z. H. Effect of elevated levels of carbon dioxide on the activity of rubisco and crop productivity. **Crop Production and Global Environmental Issues**. p. 241-256, 2015.
- WEI, X. *et al.* Soybean mutants lacking abundant seed storage proteins are impaired in mobilization of storage reserves and germination. **ACS omega**, v. 5, n. 14, p. 8065-8075, 2020. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c00128>.
- WENDT, L. *et al.* Relação entre testes de vigor com a emergência no campo em sementes de soja. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 12, p. 166–171, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i2a5435>.
- WIJewardana, C., REDDY, K. R. AND BELLALOU, N. Soybean seed physiology, quality, and chemical composition under soil moisture stress. **Food Chemistry**, v. 278, p. 92–100, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.035>.
- WILCOX, J. R.; CAVINS, J. R. Backcrossing high seed protein to a soybean cultivar. **Crop Science**, v. 35, p. 1036-1041, 1995.
- WILCOX, J. R.; Increasing seed protein in soybean with eight cycles of recurrent selection. **Crop Science**, v.38, p. 1536-1540, 1998.
- WILSON, E. W. *et al.* Genetic gain × management interactions in soybean: II. Nitrogen utilization. **Crop Science**, v. 54, n.1, p. 340–348, 2014.
- WILSON, R. F. **Seed composition**. In: BOERMA, H.R.; SPECHT, J.E. (Ed.). Soybeans: improvement, production and uses. 3.ed. Madison: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America, 2004. p. 621-677.
- WIMALASEKERA, R. Role of Seed Quality in Improving Crop Yields. **Crop Production and Global Environmental Issues**, p. 153–168, 2015.
- WOYANN, L. G. *et al.* Multiple-trait selection of soybean for biodiesel production in Brazil. **Industrial Crops Products**, v. 140, p. 111721, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111721>.
- WU, H. *et al.* Transesterification of soybean oil to biodiesel using zeolite supported CaO as strong base catalysts. **Fuel Process Technol**, v. 109, p. 13–18, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.032>.
- XING, X. *et al.* Evaluation of high-oil and high-protein soybean using component pricing. **J. Crop Improv**, v. 32, p. 264–280, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/15427528.2017.1414722>.
- YAKLICH, R. W.; DAUN, J. K.; De CLERCQ, D. R. Historical trends in the composition of soybean, canola-rape, and flax seeds grown in the United States and Canada. **Journal of the American Oil Chemists Society**, Urbana, v. 79, n.2, p. 207-208, 2002.

YAN, W. **Crop variety trials: Data management and analysis**. John Wiley & Sons, 2014.

ZAMBIAZI, R. C.; PRZYBYLSKI, R.; MENDONÇA, C. B.; Fatty acid composition of vegetable oils and fats. **B. CEPPA**, Curitiba, v. 25, n. 1, p. 111-120, 2007.

ZHANG, J.; KIRKHAM, M. B. Lipid peroxidation in sorghum and sunflower seedlings as affected by ascorbic acid, benzoic acid and propyl gallate. **Journal Plant Physiology**, v. 35, p. 489–493, 1996.

ZHANG, G. *et al.* PLD α 1-knockdown soybean seeds display higher unsaturated glycerolipid contents and seed vigor in high temperature and humidity environments. **Biotechnology for Biofuels**, v. 12, n. 9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1340-4>.

ZIMMER, P. D. **Fundamentos da qualidade de sementes**. In: PESKE, S. T.; VILLELA, F. A.; MENEGHELLO, G. E (Orgs.). Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos. 3.ed, Pelotas, Editora Universitária/UFPel, p. 106-160, 2012.