



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

**USO DE FILME DE PARTÍCULA À BASE DE CÁLCIO:
FISIOLOGIA DAS PLANTAS E QUALIDADE DE SEMENTES
NA CULTURA DA SOJA**

JÚLIO RENOVATO DOS SANTOS

2024



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

JULIO RENOVATO DOS SANTOS

**USO DE FILME DE PARTÍCULA À BASE DE CÁLCIO:
FISIOLOGIA DAS PLANTAS E QUALIDADE DE SEMENTES
NA CULTURA DA SOJA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Doutor em Ciências”.

Orientador

Prof. Dr. Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Junior

Coorientador

Prof. Dr. Jailson Lara Fagundes

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2024

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

Santos, Júlio Renovato dos.
S237r Uso de filme de partícula à base de cálcio: Fisiologia nas plantas e qualidade de sementes na cultura da soja / Júlio Renovato dos Santos; orientador Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Júnior. – São Cristóvão, SE, 2024.
81 f.: il.

Tese (doutorado em Agricultura e Biodiversidade) –
Universidade Federal de Sergipe, 2024.

1. Agrobiodiversidade. 2. Fisiologia vegetal. 3. Soja. 4. Aquecimento global. 5. Radiação. 6. Fotossíntese. I. Oliveira Júnior, Luiz Fernando Ganassali de, orient. II. Título.

CDU 633.34

JULIO RENOVATO DOS SANTOS

**USO DE FILME DE PARTÍCULA À BASE DE CÁLCIO: FISIOLOGIA DAS
PLANTAS E QUALIDADE DE SEMENTES NA CULTURA DA SOJA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Doutor em Ciências”.

APROVADA em 25 de julho de 2024.

Dra. Renata Silva Mann



Dr. Marcelo Augusto Gutierrez Carnelossi



Dra. Helena Maura Torezan Silingardi



Dr. Leonardo Lucas Carnevalli Dias



Prof. Dr. Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Junior
UFS
(Orientador)

Prof. Dr. Jailson Lara Fagundes
UFS
(Coorientador)

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL

*A Deus e a todos os que me ajudaram ao
longo desta caminhada*
Dedico

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer em primeiro lugar ao meu Deus pelo dom da vida e por me proporcionar determinação e saúde durante essa jornada.

A minha mãe, Carmelia Renovato dos Santos, e ao meu pai, Jose dos Santos, por todos os anos de carinho, conselhos e apoio na minha caminhada.

A minha irmã, Edna, meus sobrinhos, Wefesson e Jose Cristian, pelo carinho e por sempre estarem ao meu lado e por compreenderem as minhas ausências durante esse momento importante de minha vida.

A minha noiva, Jussiane, pelo companheirismo, paciência e por todos os momentos que estive ao meu lado, e pelas palavras de conforto e estímulo, bem como por ser minha fiel amiga nos momentos de estresse.

Agradeço aos meus amigos do ECOPOC (Laboratório de Ecofisiologia e Pós-Colheita) por terem contribuído na execução dos meus trabalhos. Idamar, Pedro, Pryanka, João Paulo, Wendel, Genilza, muito obrigado por sempre serem solícitos e prestativos.

Agradeço a toda equipe técnica do Campus Rural pelo apoio, não só durante a condução do experimento, mas principalmente por sempre compartilhar os conhecimentos necessários para o sucesso do experimento.

Agradeço à Professora Renata Mann, e sua equipe, Crislaine e Valdinete pelo apoio durante a execução do meu trabalho, tanto ao disponibilizar o laboratório, quanto na construção teórica do meu trabalho.

Ao Professor Dr. Marcelo Carnelossi e à Professora Dra. Aline pela contribuição da minha formação acadêmica bem como na construção dos meus artigos.

Ao Professor e Coorientador Dr. Jailson Lara Fagundes, pelo apoio e pelos conselhos partilhados.

Ao meu orientador e amigo, Professor Dr. Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Junior, por todo carinho, conselhos, confiança e todos os ensinamentos e por estar sempre ao meu lado nos momentos difíceis da minha caminhada. Muito obrigado.

À Universidade Federal de Sergipe e ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade, pela oportunidade de fazer esse doutorado e pela estrutura física cedida.

BIOGRAFIA

JULIO RENOVATO DOS SANTOS, filho de José dos Santos e Cramélia Renovato dos Santos, nasceu 24 de junho de 1982, na cidade Guarujá-SP.

No ano de 2005 ingressou no curso de Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Sergipe.

Em 2010 iniciou o mestrado em Agroecossistemas pela Universidade Federal de Sergipe.

Em agosto de 2020, iniciou o doutorado no Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade pela Universidade Federal de Sergipe.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT	vi
1 INTRODUÇÃO GERAL	7
2 REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1 A cultura da soja	9
2.2 Mudanças climáticas.....	9
2.3 Temperatura e radiação na fisiologia da planta	10
2.4 Filme de partícula	11
2.5 Fotossíntese, clorofila e fluorescência.....	11
2.6 Qualidade de sementes.....	14
2.7 Testes de germinação e vigor.....	15
2.8 O uso do GroundEye como ferramenta na avaliação da qualidade de sementes.....	15
3. Referências bibliográficas	18
4. ARTIGO 1	27
Aumentando a produção de soja em regiões de alta intensidade luminosa: revelando o impacto da utilização de filme de partícula à base de cálcio.....	27
RESUMO	27
ABSTRACT	28
4.1 Introdução.....	29
4.2 Material e Métodos.....	30
4.2.1 Área experimental.....	30
4.2.2 Cultivares.....	30
4.2.3 Manejo da irrigação	30
4.2.4 Gerenciamento de culturas	31
4.2.5 Produtividade.....	32
4.2.6 Análises fisiológicas	32
4.2.6.1 Taxa de fotossíntese líquida	32
4.2.6.2 Índices de clorofila	32
4.2.6.3 Fluorescência transitória da clorofila <i>a</i>	33
4.2.7 Delineamento experimental.....	33
4.2.8 Análise estatística	33
4.3 Resultados.....	33
4.3.1 Temperatura do ar e foliar	33
4.3.2 Índices de clorofila	34
4.3.3 Taxa de fotossíntese líquida	34
4.3.4 Fluorescência transitória da clorofila <i>a</i>	34
4.3.5 Produtividade	35
4.4 Discussão.....	44
4.5 Conclusões.....	47
4.6 Referências Bibliográficas.....	48
5. ARTIGO 2.....	54
QUALIDADE EM SEMENTES USANDO TRATAMENTO MEDIADO POR FILME DE PARTICULA À BASE DE CÁLCIO.....	54
RESUMO	54
ABSTRACT	55
5.1 Introdução.....	56
5.2 Material e Métodos.....	57

5.2.1 Gerenciamento da cultura.....	57
5.2.2 Material Biológico.....	57
5.2.3 Tratamento Fotoprotetor.....	57
5.2.4 Produtividade.....	57
5.2.5 Análise de Imagem das Sementes	58
5.2.6 Massa de Mil Sementes	58
5.2.7 Teor de Água	58
5.2.8 Teste de Germinação	58
5.2.9 Índice de Velocidade de Germinação (IVG).....	58
5.2.10 Análise de Imagem de Plântulas	58
5.2.11 Massa fresca e Massa seca das Plântulas	58
5.2.12 Delineamento e Análise Estatística	58
5.3 Resultados e discussão	59
5.4 Conclusões.....	69
5.5 Referências Bibliográficas.....	70
6. Considerações Finais.....	72

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

Figura	Página	
1	Temperatura máxima, mínima e média do ar (°C), radiação solar acumulada (MJ m ⁻²) e precipitação acumulada diária (mm) de setembro a dezembro de 2021, da estação meteorológica automática de Aracaju, no estado de Sergipe, Brasil, localizada a uma distância de 20 quilômetros da unidade experimental. Fonte: INMET (2021).	31
2	Folhas de soja tratadas por diferentes concentrações de óxido de cálcio em folhas de plantas de soja. São Cristóvão-SE, 2021	32
3	Diferença da temperatura foliar e do ar da soja (<i>Glycine max</i> (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B) nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO). Sendo que o valor de L* foi 39,26; 53,08; 62,08 e 73,66% para o controle, 3, 6 e 9% de CaO. As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada dose (pelo teste de Tukey, p ≤0,05). Os intervalos nas barras correspondem ao desvio padrão	36
4	Clorofila a da soja (<i>Glycine max</i> (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B), nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das concentrações dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada concentração (pelo teste de Tukey, p ≤0,05). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão	36
5	Clorofila b da soja (<i>Glycine max</i> (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B), nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das concentrações dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada concentração (pelo teste de Tukey, p ≤0,05). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão.	37
6	Taxa fotossintética da soja (<i>Glycine max</i> (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B) nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das concentrações dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada concentração de filme de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO) (pelo teste de Tukey, p ≤0,05). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão.	37
7	Fluorescência variável da clorofila a na cultivar 1 submetida a diferentes doses de CaO em duas fases, vegetativa (A) e reprodutiva (B). O transiente foi duplamente normalizado entre os passos O amostrado a 50 μ s e P, geralmente atingido em torno de 200 ms. A emissão de fluorescência normalizada dupla OP é indicada como V. As etapas intermediárias J e I, amostradas em 2 e 30 ms, respectivamente.	38
8	Fluorescência variável da clorofila a na cultivar 2 submetida a diferentes doses de CaO em duas fases, vegetativa (A) e reprodutiva (B). O transiente foi duplamente normalizado entre os passos O amostrado a 50 μ s e P, geralmente atingido em torno de 200 ms. A emissão de fluorescência normalizada dupla	38

- OP é indicada como V. As etapas intermediárias J e I amostradas em 2 e 30 ms, respectivamente.
- 9 Plabs e OCE da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B) nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO), sendo que o Plabs está representado em barras e OEC em linha. As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das concentrações dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada concentração de filme de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO) (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão 39
- 10 Modelo foliar mostrando fluxos fenomenológicos de energia por seção transversal excitada (CS) em folhas da cultivar 1 em diferentes doses de filme à base de CaO (0%: A; 3%: B; 6%: C e 9%: D) na fase vegetativa e reprodutiva. Cada valor relativo dos parâmetros medidos é uma média ($n = 3$) e a largura de cada seta corresponde à intensidade do fluxo. Seta amarela – ABS/CS, fluxo de absorção por CS; seta azul – TR/CS, fluxo de energia aprisionado por CS; seta marrom – ET/CS, fluxo de transporte de elétrons por CS; laranja – RE/CS, fluxo de elétrons excitados de QA até os aceptores finais do PSI por seção transversal de PSII; seta vermelha – DI/CS, fluxo de energia dissipada por CS. As médias seguidas pela mesma letra minúscula (todas as colunas em doses diferentes) e maiúscula (para comparar as fases) para cada parâmetro não são significativamente diferentes umas das outras usando o teste LSD ($P \leq 0,05$). 40
- 11 Modelo foliar mostrando fluxos fenomenológicos de energia por seção transversal excitada (CS) em folhas da cultivar 2 em diferentes doses de filme à base de CaO (0%: A; 3%: B; 6%: C e 9%: D) na fase vegetativa e reprodutiva. Cada valor relativo dos parâmetros medidos é uma média ($n = 3$) e a largura de cada seta corresponde à intensidade do fluxo. Seta amarela – ABS/CS, fluxo de absorção por CS; seta azul – TR/CS, fluxo de energia aprisionado por CS; seta marrom – ET/CS, fluxo de transporte de elétrons por CS; laranja – RE/CS, fluxo de elétrons excitados de QA até os aceptores finais do PSI por seção transversal de PSII; seta vermelha – DI/CS, fluxo de energia dissipada por CS. As médias seguidas pela mesma letra minúscula comparam doses e maiúscula comparam fase vegetativa para cada parâmetro não são significativamente diferentes umas das outras usando o teste LSD ($P \leq 0,05$). 41
- 12 Rendimento da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) da cultivar 1 e cultivar 2 em tonelada por hectare ($t.ha^{-1}$), após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (0, 3, 6 e 9% de CaO). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada dose (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão. 42
- 13 Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson dos parâmetros fotossintéticos na cultivar 1 submetida a diferentes doses de CaO na fase vegetativa 43
- 14 Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson dos parâmetros fotossintéticos na cultivar 1 submetida a diferentes doses de CaO na fase reprodutiva 43
- 15 Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson dos parâmetros fotossintéticos na cultivar 2 submetida a diferentes doses de CaO na fase vegetativa 43

16	Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson dos parâmetros fotossintéticos na cultivar 2 submetida a diferentes doses de CaO na fase Reprodutiva.	44
17	Mapa conceitual do efeito do filme de partícula nas variáveis estudadas.	47

ARTIGO 2

Figura		Página
1	Produtividade de duas cultivares de soja (FTR3191 PRO - C1 – recomendada e 57i59RSF IPRO - C2 – não recomendada) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada dose (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão	59
2	Imagens de sementes de soja da cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B), com detalhes em cores e textura, diâmetro máximo e mínimo obtido em equipamento GroundEye	60
3	Resposta das propriedades geométricas e de textura de sementes de duas cultivares de soja (FTR3191 PRO (C1) e 57i59RSF IPRO (C2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%). Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$).....	61
4	Teor de água (A, B), primeira contagem (C, D), germinação (E, F) e índice de velocidade de germinação (G, H) para duas cultivares de soja (FTR3191 PRO: cultivar 1 e 57i59RSF IPRO: cultivar 2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%). Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$).	63
5	Imagem das plântulas das duas cultivares de soja (FTR3191 PRO - C1 e 57i59RSF IPRO - C2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%) (A e B). Comprimento da parte aérea das plântulas (C e D). Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem a influência das médias das doses entre as cultivares (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$).	65
6	Comprimento da raiz (cm) e massa seca (mg) de plântulas de duas cultivares de soja (FTR3191 PRO - C1 e 57i59RSF IPRO - C2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%). Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses entre cultivares (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$).	66
7	Massa fresca (mg) de plântulas de duas cultivares de soja (FTR3191 PRO - C1 e 57i59RSF IPRO - C2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%).....	67
8	Análise de Componentes Principais (PCA) para variáveis físicas e fisiológicas de sementes e plântulas de duas cultivares (FTR3191 PRO: cultivar 1 e 57i59RSF IPRO: cultivar 2) de soja submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%).	68
9	Matriz de correlação de parâmetros físicos e fisiológicos de sementes e plântulas de duas cultivares (FTR3191 PRO - C1 e 57i59RSF IPRO - C2) de soja submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%).	69

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CaO: Óxido de cálcio;
 Chl a: Clorofila a;
 Chl b: Clorofila b;
 OJIP: Fluorescência transitória polifásica;
 F0: Fluorescência inicial;
 Fm: Fluorescência máxima;
 I: Fluorescência no ponto I;
 K: Fluorescência no ponto K;
 OEC: Centros de evolução de oxigênio;
 ABS/CS: Fluxo de fótons absorvidos (ABS) por seção transversal PSII excitada (CS) de fluorescência inicial;
 TR/CS: Fluxo máximo de elétrons energizados aprisionados pela seção transversal do PSII na fluorescência inicial;
 ET/CS: Fluxo de elétrons de QA- para PQ por seção transversal PSII em fluorescência inicial;
 RE/CS: Fluxo de elétrons excitados de aceitadores PSI finais QA para seção transversal PSII em fluorescência máxima;
 DI/CS: Dissipação de energia não fotoquímica em todas as seções PSII;
 RC/CS: Densidade de centros de reação (QA reduzindo centros de reação de PSII) por seção transversal;
 PI_{ABS}: Índice de Desempenho em base de absorção;
 CRs: Centros de reação ativos;
 A: Taxa líquida de fotossíntese ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); t ha^{-1} : Toneladas por hectare;
 PSII: Fotossistema II;
 PQ – Plastoquinona;
 PSI - Fotossistema I;
 QA - Quinona A;
 QB - Quinona B;
 UV: Radiação ultravioleta;
 L: Luminosidade;
 NADPH: Nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato,
 Prod: Produtividade da soja;
 TEMDIF: Diferença da temperatura foliar em relação à temperatura ambiente.
 C1: Cultivar FTR3191 IPRO;
 C2: Cultivar 57I59RSF IPRO;
 PC_G: Primeira Contagem Germinação;
 G: Germinação;
 G_Dmax; Diâmetro Máximo;
 T_HH: Textura Haralick Homogeneidade;
 CPA: Comprimento da Parte Aérea;
 CR: Comprimento da Raiz;
 MF: Massa Fresca da parte área da plântula (MF);
 MS: Massa Seca área da plântula (MS);
 Dim1: Dimensão principal;
 PCA: Análise de Componentes Principais
 T.ha^{-1} : Toneladas por hectare.

RESUMO

SANTOS, Júlio Renovato. **Uso de filme de partícula à base de cálcio: Fisiologia das plantas e qualidade de sementes na cultura da soja.** São Cristóvão: UFS, 2024. 81. (Tese –Doutorado em Agricultura e Biodiversidade)*.

A cultura da soja é de extrema importância para a economia mundial, sendo fonte de óleo vegetal e proteínas, usado como matéria-prima para a produção de diversos produtos para alimentação humana e animal. Os maiores produtores dessa cultura são Brasil, EUA, Argentina e China, representando cerca de 90% da produção mundial. No entanto, a produtividade está ameaçada pelas mudanças climáticas, que estão se intensificando com aumento anual da temperatura, incidência de raios ultravioleta, infravermelhos e redução do período de chuvas. As mudanças estão causando estresses nas plantas, resultando em danos ao processo fisiológico, impactando negativamente o crescimento e a produção. Na cultura da soja, os estresses causados pela temperatura e luminosidade afetam diretamente a fotossíntese, levando à redução das taxas fotossintéticas devido à menor disponibilidade de CO₂. Nessas condições, há um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio e fotoinibição, resultando em queda na produtividade e qualidade da semente. A implementação de tecnologias alternativas é essencial para minimizar os efeitos prejudiciais das mudanças climáticas. Nesse sentido, o uso de filmes de partículas surge como uma ferramenta para mitigar os efeitos adversos das condições climáticas durante o ciclo das culturas, reduzindo os impactos das altas temperaturas e radiação através do sombreamento artificial proporcionado pelos filmes. Essa tecnologia aumenta a reflexão do excesso de radiação fotosinteticamente ativa na cultura, protegendo o conteúdo de clorofila e influenciando positivamente na fluorescência transitória da clorofila. Nesse sentido, o presente trabalho tem como finalidade avaliar o efeito do filme de partícula à base de óxido de cálcio em diferentes concentrações nos parâmetros ecofisiológicos e a qualidade das sementes. Assim, foram avaliados os parâmetros ecofisiológicos, tais como taxa de fotossíntese líquida, índices das clorofilas *a* e *b*, fluorescência transitória da clorofila *a*. A qualidade das sementes foi determinada por meio de análise de imagem das sementes, massa de mil sementes, teor de água, teste de germinação, índice de velocidade de germinação, análise de imagem de plântulas, peso seco das plântulas. Os resultados demonstraram que a utilização do filme de partícula aumentou a eficiência do sistema fotossintético e na produtividade, bem como influencia de forma positiva a qualidade das sementes. Nesse sentido, esta tecnologia se torna uma alternativa viável para o manejo da cultura da soja por meio da mitigação do estresse abiótico causado nas plantas no campo e por aumentar sua produtividade gerando mais renda aos produtores.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill, óxido de cálcio, fisiologia vegetal, Groundeye®, vigor, mudanças climáticas, aquecimento global.

* Comitê Orientador: Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Junior – UFS (Orientador), Jailson Lara Fagundes– UFS (Coorientador).

ABSTRACT

Santos, Júlio Renovato. Use of calcium-based particle film: plant physiology and seed quality in soybean cultivation. São Cristóvão: UFS, 2024. 81p. (Dissertation - Doctor of Science in Agriculture and Biodiversity).

Soybean cultivation is extremely important for the global economy as soybean is a source of vegetable oil and proteins and is used as a raw material in various products for human and animal consumption. The largest producers of this crop are Brazil, the USA, Argentina, and China, collectively representing approximately 90% of global production. However, yield is threatened by the intensity of climate change, with annual increases in temperature, incidence of ultraviolet and infrared rays, and reduction in the rainy season. These changes cause stress in plants, resulting in damage to the physiological process and negatively impacting growth and production. In soybean cultivation, stresses caused by temperature and light directly affect photosynthesis, leading to a reduction in photosynthetic rates due to the lower availability of CO₂. Under these conditions, the production of reactive oxygen species and photoinhibition increase, resulting in decreased yield and seed quality. It is necessary to implement alternative technologies to minimize the harmful effects of climate change. In this sense, the use of particle films has emerged as a tool to mitigate the adverse effects of climatic conditions during the crop cycle. The artificial shading provided by the films reduces the impacts of high temperatures and radiation. Particle films increase reflection of excess photosynthetically active radiation in the crop, protecting the chlorophyll content and positively affecting the transient chlorophyll fluorescence. The aim of the present study was to evaluate the effect of a calcium oxide-based particle film at different concentrations on soybean ecophysiological parameters and seed quality. Thus, ecophysiological parameters such as net photosynthetic rate, chlorophyll a and b indices, and transient chlorophyll a fluorescence were evaluated. Seed quality was determined using seed image analysis, thousand-seed weight, water content, the germination test, the germination speed index, seedling image analysis, and seedling dry weight. The results showed that the use of particle film increased the efficiency of the photosynthetic system and yield, and positively affected seed quality. This technology proves to be a viable alternative for managing soybean crops by mitigating the abiotic stress on plants in the field and by increasing their yield, generating more income for producers.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill, calcium oxide, plant physiology, Groundeye®, vigor, climate changes, global warming.

* Advisory Committee: Luiz Fernando Ganassali de Oliveira Junior – UFS (Advisor), Jailson Lara Fagundes– UFS (Adjunct advisor).

1. INTRODUÇÃO GERAL

As mudanças climáticas decorrentes das ações antrópicas constituem um dos grandes desafios para a manutenção das espécies vegetais no âmbito global, tanto em ambientes naturais (Vilela *et al.*, 2018), como em áreas agrícolas, refletindo no desenvolvimento da planta e limitando sua produtividade. O efeito negativo desses fatores vem sendo um alerta aos produtores e pesquisadores de soja, visto que a limitação da produção desse grão poderá resultar direta e indiretamente em uma crise na alimentação humana e na economia.

Dentre esses fatores abióticos que afetam o desenvolvimento das plantas, a radiação solar e temperatura são os de maiores limitações (Jiang *et al.*, 2004; Brito *et al.*, 2019a), pois influenciam diretamente no máximo rendimento das culturas (Boari *et al.*, 2016; Oliosi *et al.*, 2017; Conde *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Brito *et al.*, 2019a).

O aumento constante da temperatura e a alta radiação solar (principalmente ultravioleta-UV) contribuem para a redução das taxas fotossintéticas, limitando desta forma a atividade estomática e provocando distúrbios nos processos bioquímicos e fotoquímicos das plantas (Nievola *et al.*, 2017). Altas temperatura do ar influenciam diretamente as reações fisiológicas e bioquímicas, reduzindo a produtividade (Tacarindua *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2020). Sabe-se que para o crescimento adequado da soja, a exigência de temperatura varia entre 20 °C e 30 °C, quaisquer valores fora desta faixa ótima de temperatura podem ser danosos para a cultura e refletir na sua produtividade (Siebers *et al.*, 2015; Salib, 2018).

Para minimizar os efeitos deletérios das mudanças climáticas, técnicas vêm sendo desenvolvidas, a exemplo do uso de filmes de partículas, que são ferramentas com grande potencial para mitigar o impacto negativo durante o desenvolvimento das plantas, a exemplo da temperatura excessiva do ar e alta irradiância (Glenn, 2012). O uso dessa tecnologia tem se mostrado eficaz para a agricultura, fornecendo mecanismos de fotoproteção para os fotossistemas e para a cadeia de transporte de elétrons (Boari *et al.*, 2016; Dinis *et al.*, 2018).

O sombreamento artificial nas plantas promovido pelo uso do filme de partículas, aumenta a reflexão do excesso de radiação (Dinis *et al.*, 2018; Oliveira Júnior *et al.*, 2019) e diminui a temperatura da superfície foliar (Steiman *et al.*, 2007; Oliveira *et al.*, 2020). Estudos demonstram a eficiência do filme no processo fisiológico, a exemplo da cultura do tomateiro (Silva *et al.*, 2019b), em noqueira persa (Gharaghani *et al.*, 2018), em videira (Brillante *et al.*, 2016), na cultura do feijão-caupi (Oliveira Júnior *et al.*, 2019), feijão e tangerina (Boari *et al.*, 2015). Contudo, ainda são escassos estudos voltados para a cultura da soja.

A determinação de alguns parâmetros fisiológicos possibilita o entendimento do efeito do filme de partícula em diversas culturas amplamente utilizadas na pesquisa da fotossíntese (Mishra *et al.*, 2016; Kalaji *et al.*, 2017). Dentre esses parâmetros, as características da fluorescência da clorofila *a* são essenciais, pois são usadas para medir o rendimento quântico do fotossistema II (PSII) (Stirbet *et al.*, 2018). Outra medição extremamente importante é das trocas gasosas, que são parâmetros essenciais para verificar o efeito benéfico do filme na atividade fotossintética, efeito esse verificado por Dinis *et al.* (2018), Silva *et al.* (2019b) e Brillante *et al.* (2016).

A qualidade da semente também é outro fator extremamente influenciado pelo estresse abiótico, pois condições de altas temperaturas e radiação solar podem interferir o processo fisiológico nas plantas-mãe que resultam na formação da semente e, portanto, fundamental para verificar o potencial produtivo da cultura que reflete diretamente na produção agrícola (Ribeiro, 2021), pois a qualidade pode resultar em população adequada de plantas, e maior velocidade de emergência e desenvolvimento (Zuchi, 2015), garantindo maior produtividade. A qualidade da semente pode ser influenciada por diversos fatores, como as cultivares utilizadas e suas variações genotípicas, as condições climáticas, a sanidade das sementes e a fertilidade do solo (Vinhal-Freitas *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012; Ambika *et al.*, 2014; Pinto *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o estudo do efeito do filme de partícula na qualidade de sementes se faz necessário, visto que o filme atua em diversos processos fisiológicos da planta e a avaliação da

qualidade do potencial fisiológico pode ser determinada pela germinação (viabilidade) e vigor (Pinto *et al.*, 2018). A avaliação da qualidade das sementes pode ser estudada com o uso de ferramentas automatizadas que usem algorítmicos para a análise de imagens de plântulas e sementes visando à redução da subjetividade (Acha *et al.*, 2020). Vários trabalhos demonstram a eficiência do uso da análise de imagens, a exemplo de estudos com a finalidade de avaliar a qualidade fisiológica de sementes de milho (Pinto *et al.*, 2015), de soja (Andrade *et al.*, 2016; Ribeiro, 2021) e de café (Abreu *et al.*, 2016). Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi explorar e comparar a máxima produtividade de duas cultivares de soja, 57i59RSF IPRO e FTR3191 IPRO, e o efeito na qualidade de sementes, por meio do uso do filme de partículas à base de cálcio.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merr) é uma planta herbácea, da família Fabaceae (*Leguminosae*), subfamília das Papilionoideae e hábito de crescimento ereto. É uma planta oleaginosa, líder mundial no fornecimento de proteínas essenciais para nutrição humana e animal (Wijewardana *et al.*, 2018; Salib, 2018; Iqbal *et al.*, 2019).

É a oleaginosa mais importante do mundo (Teodoro *et al.*, 2019), com uma contribuição de mais de 60% para a produção total de oleaginosas e mais de 70% para o consumo total de farinha de proteína vegetal (SoyStats, 2018), em que se coloca entre as cinco culturas mais importantes do mundo (Xiong, 2021). Devido a essa importância, seu cultivo tem crescido consideravelmente nas últimas três décadas.

A soja é cultivada em mais de 60 países (Cotrim *et al.*, 2021), sendo que os maiores produtores da cultura são Brasil, EUA, Argentina e China, que correspondem a aproximadamente 90% de toda produção global (Schwalbert *et al.*, 2020). O Brasil é atualmente o maior produtor de soja, com cerca de 37,3% da produção global (Embrapa, 2021).

No entanto, a produtividade da soja vem sendo ameaçada pelas alterações climáticas, visto que o crescimento, rendimento e qualidade das sementes são fortemente controlados pelo ambiente. Nesse sentido, a produção de soja desperta preocupação, pois cerca de 90% da produção mundial ocorre sob condições de sequeiro, que são frequentemente caracterizadas por altas temperaturas e chuvas baixas ou erráticas (Thuzar *et al.*, 2010). As consequências provocadas pelas mudanças climáticas, a exemplo da elevação da temperatura e da radiação solar, e da redução das chuvas ou presença de chuvas mal distribuídas, afeta o processo fisiológico, interferindo no fluxo de elétrons, fotoxidação da clorofila das plantas, reduzindo a produção agrícola. Nesse contexto, a busca de tecnologias que mitiguem esses efeitos negativos das mudanças climáticas será crucial para garantir a produção agrícola e, conseqüentemente, a sobrevivência da humanidade.

2.2 Mudanças climáticas

A crescente demanda por alimento para atender à necessidade humana nos próximos anos resulta em uma grande preocupação quanto às novas áreas de exploração ou aumento da produtividade por meio do uso de tecnologia, visto que as terras agrícolas estão cada vez mais limitadas no seu crescimento (Ort *et al.*, 2015). Em busca de atender às demandas do crescimento populacional em alimento, existe a necessidade de exploração de novas áreas agrícolas, resultando na abertura de novas áreas de cultivo e, assim, em maiores ações antrópicas influenciando de forma crescente e direta os impactos ambientais. Esses impactos contribuem para o aquecimento global, resultante da redução da camada de ozônio, que por sua vez poderá aumentar a temperatura e a intensidade luminosa na superfície do planeta (Vilela *et al.*, 2018). O aquecimento global está diretamente associado às altas temperaturas, sendo que devido aos impactos ambientais, a temperatura tende a aumentar em intensidade (IPCC, 2021).

Um dos principais desafios da agricultura é aumentar a produção sustentável de alimentos de qualidade em um contexto de crescimento da população humana e mudanças climáticas em todo o mundo (Andrade *et al.*, 2016). Isso é ainda mais relevante pois o estresse abiótico continuará aumentando (IPCC, 2021), já que a mudança climática é uma realidade e um dos principais fatores de risco envolvidos na produção agrícola em todo o mundo (Rolla *et al.*, 2018).

O aumento da temperatura e da restrição hídrica, causados pelos estresses decorrentes dos impactos ambientais, causam efeitos prejudiciais na produtividade e qualidade das culturas (Mittler, 2006), comprometendo a segurança alimentar (Mahalingam e Bregitzer, 2019). A redução da produtividade está diretamente relacionada aos efeitos que estresses ambientais poderão causar à planta, principalmente envolvendo o processo fotossintético.

O estresse causado por altas temperaturas e radiação resultam em danos à membrana do cloroplasto, reduções no rendimento e na eficiência do fotossistema II (PSII), alterações na cinética da fluorescência da clorofila, diminuição no teor de clorofila, reduções e inibições na produção de amido e açúcares e senescência foliar prematura (Carrera *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2017). Esses processos fisiológicos são altamente sensíveis aos estresses ambientais, que poderão resultar de forma negativa no ciclo vegetativo da planta e, conseqüentemente, no rendimento da cultura (Ort *et al.*, 2015). Estudos demonstraram que estresse causado por aumento de 1 °C acima de 30 °C resulta em uma redução de rendimento de 6% para cada dia na cultura do milho de sequeiro nos Estados Unidos (Schauberger *et al.*, 2017), já a nível global essa redução pode chegar a 7% (Zhao *et al.*, 2017).

2.3 Temperatura e radiação na fisiologia da planta

A fotossíntese é o mais importante processo fisiológico que contribui para o crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como o rendimento das culturas. A fotossíntese consiste na absorção da luz solar, transporte de elétrons e ciclo de fixação-redução de carbono (Kalaji *et al.*, 2016). Porém o excesso de radiação e temperatura podem causar dano a esse sistema. A radiação solar e temperatura são os fatores de maiores limitações para as culturas (Brito *et al.*, 2019), com influência direta na produtividade das culturas econômicas (Zheng *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019).

Devido à ocorrência das mudanças climáticas nos últimos anos, a temperatura e a incidência de raios ultravioletas (UV) e infravermelhos (PAR) do planeta vêm aumentando (Kunert *et al.*, 2016), podendo causar fotoinibição proporcionada pelos danos no fotossistema das plantas, por meio da produção de espécies reativas de oxigênio que são subprodutos inevitáveis da fotossíntese, como peróxido de hidrogênio, causando danos oxidativos progressivos e, finalmente, morte celular. Para evitar danos causados pela fotoinibição, as plantas possuem mecanismos de proteção, como a dissipação de energia excessiva na forma de calor (Oliveira *et al.*, 2020).

A fotossíntese é muito sensível a altas temperaturas e pode ser parcial ou completamente inibida antes que outros sintomas de estresse sejam observados (Kalaji *et al.*, 2016), assim tem influência direta sobre reações fisiológicas e bioquímicas (Oliveira *et al.*, 2020), sendo que em condições de excesso pode reduzir as taxas de fotossíntese, limitando a atividade estomática e os distúrbios nos processos bioquímicos e fotoquímicos (Nievola *et al.*, 2017).

A assimilação fotossintética de CO₂ diminui em níveis de temperatura moderadamente a altos (até 38 °C) devido à inativação térmica da Rubisco ativase, a enzima que remove moléculas inibidoras do sítio ativo da Rubisco (Salvucci e Crafts-Brandner, 2004). Quando a temperatura da folha atinge 40 °C ocorre o comprometimento direto do PSII (Kalaji *et al.*, 2016). Isso pode ser devido a mudanças induzidas por alta temperatura nas propriedades das membranas dos tilacoides (Sharkey e Zhang, 2010), à dissociação da proteína estabilizadora de manganês do complexo do centro de reação PSII e à liberação de átomos de Mn.

Em plantas de soja, a redução da atividade fotossintética está relacionada a reduções na condutância estomática sob estresse térmico quando a planta é submetida à alta temperatura acima de 38 °C (Djanaguiraman e Prasad, 2011). Em seu trabalho, Pinto *et al.* (2018) evidenciaram que a temperatura foliar acima de 32 °C danifica a integridade da membrana na cultura da soja, acelera drasticamente o fluxo cíclico de elétrons e aumenta a relação entre fotorrespiração e fotossíntese, afetando negativamente a fotossíntese líquida. Ergo *et al.* (2018) verificaram que altas temperaturas causam baixo rendimento do enchimento de grão em virtude da redução da eficiência quântica e rendimento da fotoquímica do fotossistema II em níveis elevados de estresse oxidativo. O excesso de luz e temperatura foliar estão diretamente relacionados, pois o excesso de luz resultará no aumento da temperatura foliar, fato decorrente do mecanismo de defesa das plantas, resultado da liberação de energia em forma de calor e fluorescência. Logo, visando diminuir esses impactos causados pelas alterações climáticas e que resultem em maiores produtividades em plantas cultivadas, têm despertado o interesse em

pesquisas no avanço de tecnologias que proporcionem maior eficiência fotossintética através da redução dos estresses ambientais (Ergo *et al.*, 2021).

2.4 Filme de partícula

O Nordeste brasileiro apresenta condições climáticas favoráveis à obtenção de frutos de qualidade com períodos de seca definidos e altos níveis de radiação solar, porém quando essas condições se tornam excessivas afetam as plantas e a produção (Conde *et al.*, 2018). Nesse contexto, a utilização de tecnologia que possibilite proteção para as plantas, tem se mostrado potencialmente interessante para a agricultura, atuando como um mecanismo de fotoproteção para o fotossistema (Boari *et al.*, 2016; Dinis *et al.*, 2018, 2016a; Silva *et al.*, 2019a, Nevenka *et al.*, 2016). A exemplo dessas tecnologias, surgem os filmes de partículas que podem aliviar as condições climáticas adversas durante o desenvolvimento das culturas (Oliveira *et al.*, 2021), garantindo maiores produtividades das culturas cultivadas em áreas tropicais, caracterizadas por temperaturas e radiação solar relativamente mais elevadas (Peel *et al.*, 2007).

Os filmes são compostos por formulações aquosas com partículas minerais inertes de baixo custo, constituídas de partículas de dimensão de 2 μ m, que lhe garantem uma baixa abrasão, boa aderência na folha, funcionando como uma proteção nas folhas por meio do sombreamento superficial (Sharma *et al.*, 2015; Boari *et al.*, 2016; Glenn *et al.*, 2005), contribuindo para refletância da radiação solar e redução de temperatura foliar (Silva *et al.*, 2019a).

Esses compostos à base de cálcio podem oferecer resultados semelhantes a outros minerais ou até mesmo promover maiores benefícios, como material de sombreamento para melhorar o desempenho da planta e reduzir os impactos causados pelos estresses ambientais (Silva *et al.*, 2019b). Os filmes à base de cálcio podem ser facilmente encontrados em fontes renováveis como a reutilização de cascas de ovos (Saeb *et al.*, 2013) e materiais calcários marinhos como conchas (Lu *et al.*, 2015).

O filme de partícula, por apresentar um efeito reflexivo (Kok e Bal, 2018), tem a capacidade de refletir a radiação fotossintética ativa (PAR), ultravioleta e infravermelho (Dinis *et al.*, 2018). Essa característica torna o filme uma técnica promissora que pode melhorar a eficiência no consumo de água (Glenn e Puterka, 2005; Silva *et al.*, 2019a), além de contribuir para obstrução parcial dos estômatos conferindo propriedades antitranspirantes (Shellie; King, 2013; Boari *et al.*, 2016), resultando em maior produtividade e qualidade dos frutos. Esses efeitos foram verificados na cultura da tangerina, reduzindo a temperatura das plantas (Tsai *et al.*, 2013). Resultados semelhantes foram verificados na cultura da batata-doce (Oliveira *et al.*, 2020), do café (Silva *et al.*, 2019c), da videira (Brillante *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2019a), do tomateiro (Silva *et al.*, 2019b), em oliveiras (Brito *et al.*, 2018; Khaleghi *et al.*, 2015) e videiras (Silva *et al.*, 2019a).

Condições ideais de temperatura, radiação e disponibilidade hídrica, favorecem a atividade enzimática da Rubisco e reduzem os mecanismos fotoinibitórios e fotorrespiratórios (Rodrigues *et al.*, 2016). Além de contribuir para melhorar a fluorescência transitória da clorofila *a*, o filme também vem demonstrando resultados benéficos no incremento da taxa fotossintética líquida (Gharaghani *et al.*, 2018; Dinis *et al.*, 2018). Esses benefícios foram verificados na cultura do feijão-caupi (Oliveira Júnior *et al.*, 2019), do tomateiro (Silva *et al.*, 2019b), da batata-doce (Oliveira *et al.*, 2020), na noz persa (Gharaghani *et al.*, 2018), da maçã (Glenn, 2016) e das videiras (Silva *et al.*, 2019a).

2.5 Fotossíntese, clorofila e fluorescência

O filme pode promover adaptações do metabolismo fotossintético, como controle do estresse fotooxidativo, manutenção de compostos antioxidantes e proteção do fotossistema II (PSII) (Silva *et al.*, 2019a). As condições favoráveis proporcionadas pelo filme na temperatura foliar, na eficiência hídrica e na absorção da luz, podem favorecer a atividade enzimática da

Rubisco em cafeeiros e reduzir os mecanismos fotoinibitórios e fotorrespiratórios (Damatta *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*, 2016).

Em espécies arbóreas e arbustivas com folhas hipoestomáticas (Boari *et al.*, 2016), a aplicação de filmes de partículas na superfície foliar adaxial proporcionou fotoproteção na cultura da mangueira, do café e da noz persa (Chamchaiyaporn *et al.*, 2013; Gharaghani *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2019b; Steiman *et al.*, 2007), e temperatura foliar reduzida (Tleaf) na maçã (Glenn, 2016) e na “murcott”, um híbrido de tangerina-laranja doce (Tsai *et al.*, 2013).

A clorofila é constituída em dois tipos, a clorofila *a* (Chl *a*) e *b* (Chl *b*), sendo que a Chl *a* é considerada um conversor do centro de reação da energia, além de absorver luz, enquanto Chl *b* tem funções na absorção de energia óptica (Zhang *et al.*, 2016). Esses pigmentos estão localizados nos cloroplastos e mais de 80% da clorofila está localizada nos tilacoides grana, essencial para o funcionamento do fotossistema II (Albertsson 2001). A energia luminosa é coletada pelos complexos pigmento-proteína coletores de luz (LHCs) e transferida para dois centros de reação, PSI e PSII, que operam em série dentro da cadeia de transporte de elétrons fotossintética, onde nesse processo ocorre a produção de ATP e NADPH, essenciais para o crescimento e produtividade das plantas.

Os fatores ambientais, a exemplo da temperatura, radiação solar e precipitação, são essenciais para o funcionamento adequado da clorofila (Salib, 2018). Porém altas temperaturas e radiação poderão causar danos a esse aparato fotossintético. Essa afirmação pode ser evidenciada em trabalho onde foi verificado a redução da clorofila da folha, causando perda da capacidade fotossintética (Ergo *et al.*, 2018) em virtude das lesões do cloroplasto das folhas estressadas, que por sua vez, causam a perda de conteúdo de clorofila e afetam negativamente a fluorescência da clorofila e, conseqüentemente, danos à maquinaria fotossintética (Carrera *et al.*, 2021). Logo, esses danos resultam na diminuição da fixação de CO₂, e associado aos efeitos negativos no aparato fotossintético, resultam em menor produção de assimilados, impactando negativamente na produtividade das culturas.

A aplicação do filme de partícula de cálcio vem contribuindo para melhor desempenho da absorção da luz. Isso ocorre pois o sombreamento provocado na superfície foliar pelos filmes de partículas pode proporcionar o estímulo à biossíntese de clorofila *a* e *b* para melhorar a captação de luz em quantidade e em comprimentos de onda mais energéticos, preferencialmente capturados por Chl *b* (Li *et al.*, 2018).

Em condições de pouca luz, o aumento da concentração de Chl *b* pode contribuir para a absorção azul-violeta, funcionando como possível mecanismo adaptativo para melhorar o crescimento das plantas (Zhang *et al.*, 2016). Silva *et al.* (2019a), em seu trabalho com a cultura do tomateiro, verificaram que o filme contribuiu para o aumento da Chl *a*. Esses desempenhos referentes ao aumento da Chl *a* e *b* são um bom indicativo de maior eficiência na absorção de energia luminosa e, conseqüentemente, maior produção de energia química que refletirá no crescimento, desenvolvimento e produtividade da planta.

O uso de tecnologias que resultem na mitigação dos efeitos negativos das condições climáticas, e que proporcionem maior eficiência da atividade da clorofila é essencial para a produção agrícola, a exemplo do uso de filme à base de cálcio como mitigador de estresses climáticos.

A fluorescência da clorofila *a* é um mecanismo dissipativo de energias luminosas (luz vermelha e vermelho distante) emitidas por tecidos fotossintéticos submetidos à radiação luminosa (400-700 nm), representando uma pequena fração da energia absorvida (Porcar-Castell *et al.*, 2014), sendo sua intensidade inversamente proporcional à fração de energia usada para a fotossíntese. Por esta razão, o sinal de fluorescência da Chl *a* pode ser usado para fazer um diagnóstico da atividade fotossintética (Kalaji *et al.*, 2016, 2017). Além disso, quando a planta sofre dano em virtude de pulsos de luz mais longos, o Quinona A (QA) será reduzido e oxidado várias vezes e, sob estas condições, a fluorescência também se torna um indicador para a redução e o estado redox do pool plastoquinona (PQ), e até mesmo para o fluxo de elétrons através do PSI e PSII (Oukarroum *et al.*, 2009).

O conhecimento referente ao comportamento da fluorescência de Chl *a* em resposta a diferentes situações de estresses, combinado a métodos de diagnósticos desse comportamento, tornou-se uma ferramenta poderosa para estudos agrícolas, ambientais e ecológicos (Gottardini *et al.*, 2014). Uma das suas principais vantagens é que a observação e quantificação da fluorescência é realizada de forma não invasiva, permitindo cientistas obterem informações sobre o processo fotossintético sem destruir a amostra testada (Kalaji *et al.*, 2016).

Análises de curvas de indução de fluorescência de clorofila *a* permitem avaliação da condição fisiológica do fotossistema II (PSII) e da cadeia de transporte de elétrons, bem como nos fornecem informações referentes às relações de reações fotoquímicas dependentes de luz e reações bioquímicas independentes de luz (Kalaji *et al.*, 2017). Essas afirmações foram possíveis graças ao desenvolvimento de um método matemático conhecido como teste JIP (Strasser *et al.*, 2004), que reflete a cinética da redução do PSII, quinona A (QA), plastoquinona (PQ) e demais aceptores intersistemas e do PSI (Malaspina; Modenesi; Giordani, 2018). Essas análises fornecem informações detalhadas sobre a situação e função dos centros de reação PSII, complexo antena, bem como em lados doador e receptor do PSII (Kalaji *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2020). Ao submeter uma planta aclimatada ao escuro à luz resulta em uma curvatura induzida (O – J – I – P-transiente) da fluorescência transitória da clorofila *a* (Chl *a*) polifásica, que nos fornece informações consideráveis sobre a estrutura e função do aparelho fotossintético (Kalaji *et al.*, 2017; Strasser *et al.*, 2010; Dinis *et al.*, 2016a), baseada na teoria do “fluxo de energia” através das membranas dos tilacoides (Strasser *et al.*, 2000).

Fluorescência inicial (FO) é obtida no tempo 20 μ s ou 50 μ s (Strasser *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2016; Dinis *et al.*, 2016a), onde essa variável representa o nível basal de fluorescência confiável após a ativação da iluminação atínica, quando todos os centros de reação do PSII estão oxidados (Malaspina; Modenesi; Giordani, 2018). Geralmente, em plantas sob estresse, os índices de fluorescência inicial (FO) do fotossistema se mostram aumentados quando comparados a plantas não afetadas (Chen *et al.*, 2016). Fluorescência no ponto K (FK) corresponde à fluorescência a 300 μ s após a emissão do feixe de luz sobre folhas adaptadas ao escuro por 30 min. A fluorescência no ponto J da curva OJIP corresponde à emissão em 2.000 μ s ou 2ms após emissão de luz. Enquanto o ponto I da curva OJIP corresponde à emissão de fluorescência a 30.000 μ s ou 30ms. A fluorescência do ponto P corresponde ao valor máximo de emissão de luz (FM) durante o período estabelecido para registro do sinal na curva OJIP. Centros de evolução de oxigênio (OEC) são locais onde ocorrem a foto-oxidação da água, que está diretamente relacionada à fluorescência variável relativa no ponto K (300 μ s) (VK), que por sua vez está diretamente relacionada a estresses por altas temperaturas, onde o aumento de VK sinaliza danos aos OEC (Chen *et al.*, 2016).

Um conjunto de parâmetros utilizados para avaliar fluorescência são os fluxos “fenomenológicos” para CS do PSII, que se tratam na verdade das áreas para captura de fótons pelos pigmentos absorvedores de luz nas antenas do PSII (Stirbet *et al.*, 2018). Os fluxos “fenomenológicos” para CS (seção transversal (Cross Section - CS)) do PSII referem-se às áreas de captura de fótons pelos pigmentos absorvedores de luz nas antenas do PSII, que são utilizados como parâmetros para avaliar fluorescência (Stirbet *et al.*, 2018). Nesse sentido, estes parâmetros podem ser utilizados para fornecer informações referentes ao funcionamento do fotossistema. Dentre os parâmetros usados para estudar a fluorescência temos o fluxo de fótons absorvidos (ABS) por seção transversal excitada do PSII (CS), que consiste na relação entre a fluorescência inicial (ABS/CS \approx FO) e a fluorescência máxima (ABS/CSM \approx FM), o fluxo de elétrons presos na seção transversal do PSII (TR0/CS), o fluxo de elétrons da QA⁻ para PQ por seção transversal do PSII (ET/CS), o fluxo de elétrons excitados dos aceptores finais do PSI da QA do PSII (RE/CS), a dissipação de energia não fotoquímica em todas as seções do PSII (DI/CS), bem como o índice de desempenho na base de absorção (PI_{ABS}). O PI_{ABS} combina respostas do PSII das propriedades fotoquímicas e não fotoquímicas e a densidade de RCs ativos pela clorofila, onde seu comportamento pode

resultar em uma resposta apenas ao estresse térmico (Chen *et al.*, 2016), onde permite prever o rendimento das culturas (Sayyad-amin *et al.*, 2016).

O uso de filme de partícula à base de cálcio tem demonstrado eficiência no processo fisiológico das plantas, pois essa tecnologia aumenta a reflexão do excesso de luz contribuindo para reduzir a radiação fotossinteticamente ativa (PAR), o que mitiga potenciais danos foliares promovendo sua fotoproteção (Oliveira Júnior *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2019a). Os efeitos dos filmes de partículas avaliados pelo teste JIP indicam que tais filmes reduzem a atividade dos centros de reação (RCs), aumentam ou diminuem a absorção de energia (ABS), o transporte de energia de excitação (ET) e sua captura (TR) (Dinis *et al.*, 2016b, 2018; Silva *et al.*, 2019b), além de melhorarem a dissipação de energia não fotoquímica da antena PSII (DI), com base na seção transversal (CS) de DI (Oliveira *et al.*, 2020).

O uso do filme de partícula na cultura da videira demonstrou que pode reduzir a dissipação de energia não fotoquímica na antena PSII (DI), aumentar ou reduzir a absorção de energia (ABS) e melhorar o aprisionamento (TR) e transporte (ET) de excitons (Dinis *et al.*, 2018). Dinis *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2019a), em estudo com a cultura da videira, observaram que o efeito reflexivo do filme resulta na redução da atividade nos centros de reação (RCs), mecanismos que podem estar relacionados à redução da radiação fotossintética ativa (PAR) que atinge os cloroplastos.

Resultados semelhantes foram observados na cultura do feijão-caupi (Oliveira Júnior *et al.*, 2019) e do tomateiro (Silva *et al.*, 2019b). Na cultura da batata-doce, o uso de filmes de partículas de óxido de cálcio a 10 ou 15% promoveu um sombreamento artificial nas folhas, induzindo uma fotoproteção e aumentando a produtividade da planta (Oliveira *et al.*, 2020).

Diante das respostas que o filme proporciona no processo fotossintético, o estudo da fluorescência da clorofila é amplamente utilizado na pesquisa de fotossíntese, fisiologia vegetal, fenotipagem vegetal, sensoriamento remoto de plantas e outros campos de pesquisa relacionados à fotossíntese (Kalaji *et al.*, 2016, 2017).

2.6 Qualidade de sementes

A soja é uma das principais commodities do agronegócio mundial. As sementes de soja são ricas em aminoácidos, lipídios, vitaminas e minerais e são uma fonte abundante de proteínas (Medeiros *et al.*, 2020). A obtenção de alta produtividade de soja depende do estabelecimento bem-sucedido das suas plantas, o que requer o uso de sementes de alta qualidade (Finch-Savage; Bassel, 2016), garantindo maior velocidade de emergência e desenvolvimento, podendo assim conferir aumento na produtividade (Zuchi, 2015). As sementes são responsáveis por expressar o potencial genético de produtividade, resistência ou tolerância a estresses bióticos ou abióticos, além de conferir atributos de qualidade física, fisiológica e sanitárias a quem as utiliza corretamente, garantindo assim um desempenho agrônômico não encontrado com a utilização do grão (Marcos-Filho *et al.*, 1999), visto que o mesmo não possui as características de qualidade físicas e fisiológicas para dar origem a uma nova planta com potencial produtivo.

Devido a essa importância, a qualidade da semente é um dos fatores indispensáveis para o sucesso da atividade agrícola, garantindo maior produtividade e, conseqüentemente, lucratividade. Esse sucesso se torna mais indispensável principalmente pela crescente demanda de alimentos pela população global. Assim, a qualidade das sementes está diretamente relacionada ao potencial fisiológico e físico, atributos esses fundamentais para o sucesso agrícola (Pinto *et al.*, 2018; Ambika *et al.*, 2014).

O tamanho da semente é compreendido em três dimensões, comprimento, largura e espessura (Pinto *et al.*, 2018), sendo que essas dimensões podem influenciar nas condições de disponibilidade hídrica durante o processo de germinação (Beckert *et al.*, 2000; Soares *et al.*, 2015). Sementes maiores tendem a apresentar maior quantidade de reservas armazenadas nos cotilédones e, conseqüentemente, produzem mudas mais desenvolvidas do que aquelas oriundas de sementes “menores” ($M - 0,8$ e $< M - 0,8$), sob disponibilidade hídrica adequada (Carvalho e Nakagawa, 2012). Segundo Wetzel (1978), as sementes de soja com maior

potencial fisiológico estariam compreendidas dentro dos limites $M \pm 2/64$ ” ($M \pm 0,8$ mm), sendo M a largura ou a espessura média das sementes que compõem o lote. Porém as sementes menores absorveram água mais rapidamente e apresentaram protrusão da raiz primária mais rápida do que as de tamanho médio ou maiores (Pinto *et al.*, 2018). A morfologia da semente é idêntica ao grão comercial, entretanto a semente é aquela produzida com finalidade de semeadura, sob cuidados especiais onde o que diferencia é a porcentagem de germinação e pureza mínima requeridas para sua comercialização que é de 80% e 99%, respectivamente (Brasil, 2013).

As características fisiológicas e as físicas das sementes podem ser influenciadas por inúmeros fatores, onde as características de cada cultivar estão diretamente relacionadas às condições abióticas a que elas são expostas, desde o clima, fertilidade de solo e manejo da cultura (Vinhal-Freitas *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2012; Ambika *et al.*, 2014; Pinto *et al.*, 2018). Nesse sentido, quaisquer condições a que a planta-mãe seja exposta refletem na qualidade das suas sementes.

As altas temperaturas e radiação são condições ambientais que poderão causar estresses à planta-mãe, pois esses fatores influenciam o processo fotossintético das plantas (Dinis *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2019a). Isso pode danificar a integridade da membrana na cultura da soja, acelerar drasticamente o fluxo cíclico de elétrons e aumentar a relação entre fotorrespiração e fotossíntese, afetando negativamente a fotossíntese líquida, bem como pode resultar em mecanismos fotoinibitórios e fotorrespiratórios nas plantas (Rodrigues *et al.*, 2016), que resultará em alterações bioquímicas das sementes.

Esses efeitos negativos tendem a se intensificarem devido ao aquecimento global, em que a temperatura média poderá se elevar de forma considerável (IPCC, 2021). Logo o uso de filme vem sendo utilizado para mitigar esses efeitos, proporcionando condições ideais de desenvolvimento da planta devido seu efeito reflexivo (Ahmad *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2019a; Kok e Bal, 2018). Entretanto trabalhos que investiguem os efeitos do filme na qualidade das sementes ainda são incipientes.

2.7 Testes de germinação e vigor

A comercialização de sementes tem como finalidade disponibilizar ao consumidor sementes saudáveis e com alto potencial fisiológico. Para auxiliar o processo de decisão quanto à destinação dos lotes de sementes e identificar diferenças no desempenho dos mesmos, é necessária uma avaliação do potencial fisiológico do lote (Brandani *et al.*, 2021). Nesse contexto, a avaliação geralmente é realizada por meio de testes de germinação (Medeiros *et al.*, 2019) e do vigor (Torres *et al.*, 2016), podendo determinar o potencial fisiológico das sementes (Pinto *et al.*, 2018). O teste de germinação é bastante utilizado para a avaliação da qualidade fisiológica de lotes de sementes, porém, por ser um teste realizado em condições ideais de germinação, nem sempre os resultados obtidos refletem o potencial do lote em condições de campo (Ohlson *et al.*, 2010, Torres *et al.*, 2016). Tal teste é realizado com o objetivo de se obter informação de valor prático sobre um determinado lote de sementes, onde se torna mensurável seu potencial de germinação podendo ser associado à sua qualidade fisiológica.

Outros testes são realizados visando complementar as informações obtidas pelo teste de germinação. Tais testes têm por princípio simular o potencial de emergência em campo sob condições adversas, os chamados testes de vigor. A utilização de sementes com elevado vigor pode proporcionar acréscimos de 20% a 35% no rendimento dos grãos, quando comparados ao uso de sementes de baixo vigor (Pinto *et al.*, 2018). De acordo com a definição adotada pela Association of Official Seed Analysts, “vigor de sementes compreende aquelas propriedades que determinam o potencial para uma emergência rápida e uniforme e para o desenvolvimento de plântulas normais sob uma ampla faixa de condições ambientais” (Aosa, 1983; Andriazzi *et al.*, 2020). O vigor de uma semente está relacionado à sua eficiência em desempenhar seu papel de emergir rápida e uniformemente, e desenvolver-se em condições de campo favoráveis ou não, estando este fator intimamente ligado não só com a produtividade como também a

qualidade e padronização do produto colhido. Embora os resultados dos testes de vigor não sejam componentes dos padrões estabelecidos para o comércio de sementes no Brasil ou internacionalmente, eles são muito importantes para avaliar o desempenho dos lotes de sementes durante o armazenamento e após a semeadura no campo (Rodrigues *et al.*, 2020).

2.8 O uso do GroundEye como ferramenta na avaliação da qualidade de sementes

O aprimoramento constante das tecnologias de processamento de sementes é fundamental para o setor agrícola, pois o mercado atual é exigente e consciente da importância da qualidade de sementes (Melo *et al.*, 2016). Nesse sentido, uma tecnologia agrícola que exija menos tempo e esforço humano e que tenha maior precisão de resultados cresce cada vez mais, principalmente com os avanços na área de inteligência artificial (IA) (Xavier *et al.*, 2019; Kumar e Ashok, 2020). Assim, devido à urgência na tomada de decisões na indústria de sementes e à necessidade da eliminação dos erros humanos, o desenvolvimento de métodos inovadores, tecnologias e instrumentos apropriados, as técnicas não destrutivas são ferramentas promissoras para avaliar a qualidade das sementes (Rahman e Cho, 2016).

A associação de tecnologias de imagem e técnicas avançadas de inteligência artificial tem possibilitado avanços importantes nas diferentes etapas do processo de produção de sementes (Andrade *et al.*, 2024). A análise de imagens surge como uma tecnologia inovadora para a avaliação da qualidade de sementes. Essa técnica consiste em uma ferramenta utilizada em estudos básicos e aplicados que visa elucidar diversos aspectos do comportamento das sementes e aprimorar metodologias para avaliação de diferentes atributos de qualidade das sementes (Acha e Vieira, 2020). Este equipamento possibilita analisar a morfologia externa da semente (Venora *et al.*, 2007), onde se propõe aumentar a eficiência e confiabilidade dos resultados, pois reduz o erro humano (Medeiros *et al.*, 2018, 2020; Catão *et al.*, 2020).

A utilização do estudo de imagens automatizada de sementes e plântulas está relacionada à inevitabilidade de métodos rápidos e precisos (Dell'aquila, 2009; Guedes *et al.*, 2011). A observação de estruturas como hipocótilos e raiz primária de plântulas, assim como a análise de conteúdo de reservas de sementes, são técnicas garantidas para o parecer do potencial fisiológico (Mertz *et al.*, 2009; Henning *et al.*, 2010). O uso dessa técnica vem sendo utilizado com sucesso na avaliação da qualidade de sementes de soja, grão-de-bico (Igathinathane *et al.*, 2009) e em plântulas de milho (Alvarenga *et al.*, 2012).

Dentre as diferentes tecnologias usadas para avaliação das imagens que visam avaliar a qualidade de semente temos o GroundEye. Essa tecnologia possui ferramentas avançadas de inteligência artificial (classificador, rede de decisão, rede de decisão de análise, expressão e área de interesse por cor) que auxiliam na avaliação para que ela se torne menos subjetiva, mais precisa e com possível padronização (Andrade *et al.*, 2024), por meio da extração de mais de 300 características morfológicas de sementes e mudas (Andrade *et al.*, 2016).

O GroundEye analisa imagens de sementes e de plântulas capturando informações de cor, textura e geometria de cada indivíduo da imagem, fornecendo informações do vigor, sendo recomendada para avaliação do vigor de sementes de soja (Brandani *et al.*, 2021). Andrade *et al.* (2016), ao utilizarem essa tecnologia na avaliação de sementes verdes de soja, concluíram que a análise de imagens é uma técnica confiável, rápida e objetiva que promove um nível de precisão de 99,51% na separação de sementes esverdeadas. Segundo Brandani *et al.* (2021), a eficácia do GroundEye nos resultados de vigor é evidenciada pela análise das imagens em mudas com apenas três dias de germinação. Essa abordagem representa um avanço significativo para os programas de controle de qualidade das empresas produtoras de sementes, uma vez que atende à demanda por agilidade e precisão no processo de avaliação. Essa tecnologia inovadora vem ao encontro da necessidade constante do mercado por ferramentas que permitam uma avaliação rápida e confiável da qualidade das sementes, garantindo assim a produção de mudas de alta qualidade. Xavier *et al.* (2019) utilizaram o mesmo sistema de análise de imagens e concluíram que com o sistema GroundEye foi possível distinguir as três espécies de *Amaranthus* spp. em relação às características geométricas e predominância de cores. Já Acha

e Vieira (2020), afirmam que o GroundEye foi eficiente na determinação dos diâmetros máximo e mínimo de *Stylosanthes* sp revestidos. Essa eficiência foi também observada em outros estudos realizados por Acha *et al.* (2016), Silva *et al.* (2017), Acha *et al.* (2018) e Xavier e Vieira (2018), em sementes de soja, possibilitando obter resultados mais refinados referentes ao diâmetro.

O uso do GroundEye foi utilizado com sucesso para analisar características de plântulas (comprimento médio do coleóptilo, da raiz e das plântulas) e pelos índices de vigor na cultura do milho (Pinto *et al.*, 2015), café (Abreu *et al.*, 2016) e soja (Andrade *et al.*, 2016; Acha; Vieira, 2020). Já Marques *et al.* (2019) utilizaram o sistema GroundEye para diferenciar espécies e estágios de desenvolvimento de inflorescências. Castan *et al.* (2018) encontraram resultados promissores analisando o vigor nas sementes de milho. Vasconcelos *et al.* (2018) utilizaram a mesma tecnologia e verificaram que o GroundEye é muito eficiente para avaliar a qualidade de sementes de repolho. Catão *et al.* (2020), em seu trabalho, observaram que Groundeye® foi eficiente na avaliação do vigor das sementes, sendo capaz de medir o crescimento mínimo de coleóptilo e raiz de híbridos de milho pipoca.

Apesar do Groundeye ser um equipamento que possibilita avaliação da qualidade de semente com precisão, ainda são insipientes resultados referentes ao efeito do filme de partícula na soja, necessitando de mais pesquisas que comprovem a eficiência do sombreamento no vigor de sementes.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, L. A. S.; ANDRADE, D. B.; MARQUES, E. R.; ASSIS, J. G. R.; LOPES, C. A.; CARVALHO, M. L. M. Computerized analysis in the physiological quality of coffee seeds. **International Journal of Current Research**, v. 8, n. 11, p. 40820-40823, 2016.
- ACHA, A. J.; VIEIRA, H. D. Digital image processing of coated perennial-soybean seeds. **Journal of Seed Science**, p. 12, 2020.
- ACHA, A.J.; VIEIRA, H.D.; FREITAS, M.S.M. Perennial soybean seeds coated with high doses of boron and zinc. **African Journal of Biotechnology**, v.15, n.37, p.1998-2005, 2016.
- ACHA, A.J.; VIEIRA, H.D.; SOUZA, C.L.M.; SILVA, F.W.A. Methodology of applying different doses of boron and zinc in the coating of perennial soybean seeds. **Journal of Experimental Agriculture International**, v.26, n.5, p.1-9, 2018.
- AHMAD, P.; ABDEL LATEF, A.A.; ABD ALLAH, E.F.; HASHEM, A.; SARWAT, M.; ANJUM, N.A.; GUCEL, S. Calcium and potassium supplementation enhanced growth, osmolyte secondary metabolite production and enzymatic antioxidant machinery in cadmiumexposed chickpea (*Cicer arietinum* L.). **Frontiers in Plant Science**, v.7, n.513, p.1-12, 2016.
- ALVARENGA, R.A.F.; GALINDRO, B.M.; HELPA, C. DE F.; SOARES, S.R. The recycling of oyster shells: an environmental analysis using Life Cycle Assessment. **J. Environ. Manage**, v.106, p.102–109, 2012.
- AMBIKA, S.; MANONMANI, V.; SOMASSUNDARAN, G. Review of effect of seed size on seedling vigour and seed yield. **Research Journal of Seed Science**, v.7, n.2, p.31-88, 2014.
- ANDRADE, D.B.; CARVALHO, E.R.; PIRES, R.M.O.; ROCHA, D.K.; PEREIRA, V. S.; PINTO, E.V. R. Artificial intelligence tools and a diagrammatic scale for evaluating the quality of coating in treated soybean seeds. **Neural Comput & Applic**, v. 36, p.3101–3106, 2024.
- ANDRADE, D.B.; OLIVEIRA, A.S.; PINTO, C.A.G.; PIRES, R.M.O.; OLIVEIRA, A.S.; SILVA, M.A.; CARVALHO, M.L.M. Detection of green seeds in soybean lots by the seed analysis system (SAS). **International Journal of Current Research**, v.8, n.2, p.26462, 2016.
- ANDRIAZZI, C. V. G.; ROCHA, D. K.; SOUZA, I. C. P.; BICHUETTE, S. A. Evaluation of physiological quality of corn seeds by GroundEye L800® system. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 14, 2020.
- AOSA - Association of Official Seed Analysts. **Seed vigor testing handbook**. East Lansing, AOSA. 88p. 1983
- BARROS BRANDANI, E., OLIVEIRA SILVA SOUZA, N., MATHEUS MATTIONI, N., FERNANDES DE JESUS SOUZA, F., SOUZA VILELA, M., ALVES MARQUES, É., FELIPPE DE SOUZA FERREIRA, W. Image analysis for the evaluation of soybean seeds vigor. **Acta Agronómica**, v. 70, n.3, p. 311-316, 2021.
- BECKERT, O.P.; MIGUEL, M.H.; MARCOS-FILHO, J. Absorção de água e potencial fisiológico em sementes de soja de diferentes tamanhos [Water uptake and physiological potential of soybean seeds of different sizes]. **Scientia Agricola**, v.57, p.671-675, 2000.
- BOARI, F.; DONADIO, A.; PACE, B.; SCHIATTONE, M. I.; CANTORE, V. Kaolin improves salinity tolerance, water use efficiency and quality of tomato. **Agricultural Water Management**, v. 167, p. 29–37, 2016.
- BOARI, F.; DONADIO, A.; SCHIATTONE, M. I.; CANTORE, V. Particle film technology: A supplemental tool to save water. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 154–162,

2015.

BRASIL. **Padrões para Produção e Comercialização de Sementes de Soja. [Minimum Standards for Production and Marketing of Soya bean Seeds]**, Instrução Normativa n° 45, de 17 de setembro de 2013, Publicação: D.O.U. do 20/09/13, Seção 1, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, 2013.

BRILLANTE, L.; BELFIORE, N.; GAIOTTI, F.; LOVAT, L.; SANSONE, L.; PONI, S.; TOMASI, D. Comparing kaolin and pinolene to improve sustainable grapevine production during drought. **PLoS ONE**, v. 11, n. 6, p. 1–19, 2016.

BRITO, C.; DINIS, L. T.; FERREIRA, H.; ROCHA, L.; PAVIA, I.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; CORREIA, C. M. Kaolin particle film modulates morphological, physiological and biochemical olive tree responses to drought and rewatering. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 133, n. May, p. 29–39, 2018.

BRITO, C.; DINIS, L. T.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; CORREIA, C. Kaolin, an emerging tool to alleviate the effects of abiotic stresses on crop performance. **Scientia Horticulturae**, v. 250, p. 310–316, 2019.

BRITO, C.; DINIS, L. T.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; CORREIA, C. Kaolin, an emerging tool to alleviate the effects of abiotic stresses on crop performance. **Scientia Horticulturae**, v. 250, p. 310–316, 2019.

CARRERA, C.; SOLIS, S.; FERRUCCI, M.; VEGA, C.; GALATI, B.; ERGO, V.; ANDRADE, F.; LASCANO, R. Leaf structure and ultrastructure changes induced by heat stress and drought during seed filling in field-grown soybean and their relationship with grain yield. *Ann. Brazilian Acad. Sci.* (in press), V. 93, p.4, 2021.

CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 5 ed. Jaboticabal: FUNEP, 2012. 590p.

CASTAN, D. O. C.; GOMES JUNIOR, F. G.; MARCOS FILHO, J. Vigor-S, a new system for evaluating the physiological potential of maize seeds. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 2, p. 167-172, 2018.

CATÃO, H. C. R. M.; CAIXETA, F.; LOPES, A. M.; NERY-SILVA, F. A.; SÁ JÚNIOR, A. Antioxidant activity and physiological performance of popcorn seed after saline stress and analysis of seedling images. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. 005020, 2020.

CHAMCHAIYAPORN, T.; JUTAMANEE, K.; KASEMSAP, P.; VAITHANOMSAT, P.; HENPITAK, C. Effects of kaolin clay coating on mango leaf gas exchange, fruit yield and quality. **Natural Sciences**, v.47, p. 479–491, 2013.

CHEN, S.; YANG, J.; ZHANG, M.; STRASSER, R. J.; QIANG, S. Classification and characteristics of heat tolerance in *Ageratina adenophora* populations using fast chlorophyll a fluorescence rise O-J-I-P. **Environmental and Experimental Botany**, v. 122, p. 126–140, 2016.

CHEN, Z.; XU, J.; WANG, F.; WANG, L.; XU, Z. Morpho-physiological and proteomic responses to water stress in two contrasting tobacco varieties. **Scientific Reports**, v.9, n.1, p.1-15, 2019.

CONDE, A.; NEVES, A.; BREIA, R.; PIMENTEL, D.; DINIS, L.T.; BERNARDO, S.; CORREIA, C.M.; CUNHA, A.; GERÓS, H.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Kaolin particle film application stimulates photoassimilate synthesis and modifies the primary metabolome of grape leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 223, p.47–56, 2018.

COTRIM, M. F.; GAVA, R.; CAMPOS, C. N. S.; DE DAVID, C. H. O.; REIS, I. D. A.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E. Physiological performance of soybean genotypes grown under irrigated and rainfed conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n.1, p.34–43, 2021.

DAMATTA, F.M.; GODOY, A.G.; MENEZES-SILVA, P.E.; MARTINS, S.C.V.; SANGLARD, L.M.V.P.; MORAIS, L.E.; TORRE-NETO, A.; GHINI, R. Sustained enhancement of photosynthesis in coffee trees grown under free-air CO₂ enrichment

- conditions: Disentangling the contributions of stomatal, mesophyll, and biochemical limitations. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, p. 341–352, 2016.
- DELL'AQUILA, A. Digital imaging information technology applied to seed germination testing. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, n.1, p. 213-221, 2009.
- DINIS, L. T.; BERNARDO, S.; CONDE, A.; PIMENTEL, D.; FERREIRA, H.; FÉLIX, L.; GERÓS, H.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Kaolin exogenous application boosts antioxidant capacity and phenolic content in berries and leaves of grapevine under summer stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 191, p. 45–53, 2016a.
- DINIS, L. T.; FERREIRA, H.; PINTO, G.; BERNARDO, S.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Kaolin-based, foliar reflective film protects photosystem II structure and function in grapevine leaves exposed to heat and high solar radiation. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 47–55, 2016b.
- DINIS, L. T.; MALHEIRO, A. C.; LUZIO, A.; FRAGA, H.; FERREIRA, H.; GONÇALVES, I.; PINTO, G.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Improvement of grapevine physiology and yield under summer stress by kaolin-foliar application: water relations, photosynthesis and oxidative damage. **Photosynthetica**, v. 56, n. 2, p. 641–651, 2018.
- DJANAGUIRAMAN, M.; PRASAD, P. V. V.; BOYLE, D. L.; SCHAPAUGH, W. T. High-Temperature Stress and Soybean Leaves: Leaf Anatomy and Photosynthesis. **Crop Science**, v. 51, n. 5, p. 2125–2131, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.10.0571>.
- EMBRAPA. Soja em números. 2021. URL <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>
- ERGO, V. V.; LASCANO, R.; VEGA, C. R. C.; PAROLA, R.; CARRERA, C. S. Heat and Water Stressed Field-Grown Soybean: A Multivariate Study on the Relationship between Physiological-Biochemical Traits and Yield. **Environmental and Experimental Botany**, v.148, p.1–11, 2018.
- ERGO, V. V.; VEAS, R. E.; VEGA, C. R. C.; LASCANO, R.; CARRERA, C. S. Leaf photosynthesis and senescence in heated and droughted field-grown soybean with contrasting seed protein concentration. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 437–447, set. 2021.
- FINCH-SAVAGE, W. E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 3, p. 567–591, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>.
- FIRATLIGIL-DURMUŞ, E., ŠÁRKA, E., BUBNÍK, Z., SCHEJBAL, M., KADLEC, P. Size properties of legume seeds of different varieties using image analysis. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 99, n. 4, p. 445-451, 2010.
- GHARAGHANI, A.; JAVARZARI, A. M.; VAHDATI, K. Kaolin particle film alleviates adverse effects of light and heat stresses and improves nut and kernel quality in Persian walnut. **Scientia Horticulturae**, v. 239, n. April, p. 35–40, 2018.
- GLENN, D. M. Effect of highly processed calcined kaolin residues on apple water use efficiency. **Scientia Horticulturae**, v. 205, p. 127–132, 2016.
- GLENN, D. M. The mechanisms of plant stress mitigation by kaolin-based particle films and applications in horticultural and agricultural crops. **HortScience**, v. 47, n. 6, p. 710–711, 2012. Disponível em: <https://doi:10.21273/hortsci.47.6.710>
- GLENN, D. M.; PUTERKA, G. J. Particle Films: A New Technology for Agriculture. **Horticultural Reviews**, v. 31, p. 1–44, 2005.
- GOTTARDINI, E.; CRISTOFORI, A.; CRISTOFOLINI, F.; NALI, C.; PELLEGRINI, E.; BUSSOTTI, F.; FERRETTI, M. Chlorophyll-Related Indicators Are Linked to Visible Ozone Symptoms: Evidence from a Field Study on Native Viburnum Lantana L. Plants in Northern Italy. **Ecological Indicators**, v. 39, p. 65–74, 2014.
- GUEDES, M.A.; MATA, M.E.R.M.C.; DUARTE, M.E.M.; FARIAS, P.A. Caracterização física de grãos de soja utilizando-se processamento digital de imagens. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n.3, p.279-294, 2011.

- HENNING, F. A.; MERTZ, L. M.; JACOB JUNIOR, E. A.; MACHADO, R. D.; FISS, G.; ZIMMER, P. D. Composição química e mobilização de reservas em sementes de soja de alto e baixo vigor. **Bragantia**, v. 69, n. 3, p. 727–734, 2010.
- IGATHINATHANE, C.; PORDESIMO, L. O.; BATCHELOR, W. D. Major orthogonal dimensions measurement of food grains by machine vision using ImageJ. **Food Research International**, Barking, v. 42, p. 76-84, jan. 2009.
- IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M.I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J.B.R.; MAYCOCK, T.K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, 2021. doi:10.1017/9781009157896.
- IQBAL, N.; HUSSAIN, S.; RAZA, M.A.; YANG, C.Q.; SAFDAR, M.E.; BRESTIC, M.; AZIZ, A.; HAYYAT, M.S.; ASGHAR, M.A.; WANG, X.C.; ZHANG, J.; YANG, W.; LIU, J. Drought Tolerance of Soybean (*Glycine max* L. Merr.) by Improved Photosynthetic Characteristics and an Efficient Antioxidant Enzyme Activities Under a Split-Root System. **Frontiers in Physiology**, v. 10, p.786, 2019.
- JIANG, A.C.D.; GAOB, H.Y.; ZOUB, Q.; JIANGA, G.M.; LIA, L. H. Leaf Orientation, Photorespiration and Xanthophyll Cycle Protect Young Soybean Leaves Against High Irradiance in Field. **Environmental and Experimental Botany**, v. 55, p. 1-10, 2004.
- KALAJI, H. M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I. A.; CETNER, M. D.; ŁUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R. J. Chlorophyll a Fluorescence as a Tool to Monitor Physiological Status of Plants under Abiotic Stress Conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.38, n. 4, p. 102, 2016.
- KALAJI, H. M.; SCHANSKER, G.; BRESTIC, M.; BUSSOTTI, F.; CALATAYUD, A.; FERRONI, L.; GOLTSEV, V.; GUIDI, L.; JAJOO, A.; LI, P.; LOSCIALE, P.; MISHRA, V. K.; MISRA, A. N.; NEBAUER, S. G.; PANCALDI, S.; PENELLA, C.; POLLASTRINI, M.; SURESH, K.; TAMBUSSI, E.; YANNICCARI, M.; ZIVCAK, M.; CETNER, M. D.; SAMBORSKA, I. A.; STIRBET, A.; OLSOVSKA, K.; KUNDERLIKOVA, K.; SHELONZEK, H.; RUSINOWSKI, S.; BAĞA, W. Frequently Asked Questions about Chlorophyll Fluorescence, the Sequel. **Photosynthesis Research**, v.132, n.1, p. 13–66, 2017.
- KHALEGHI, E.; ARZANI, K.; MOALLEMI, N.; BARZEGAR, M. The efficacy of kaolin particle film on oil quality indices of olive trees (*Olea europaea* L.) cv “Zard” grown under warm and semi-arid region of Iran. **Food Chemistry**, v.166, p.35–41, 2015.
- KOK, D.; BAL, E. Leaf Removal Treatments Combined with Kaolin Particle Film Technique from Different Directions of Grapevine’s Canopy Affect the Composition of Phytochemicals of cv. Muscat Hamburg (V. Vinifera L.). **Erwerbs-Obstbau**, v. 60, n. 1, p. 39–45, 2018.
- KUMAR, P.; ASHOK, G. Design and fabrication of smart seed sowing robot. *In: Materials Today: Proceedings*, 2020. pp 354–358.
- KUNERT, K.J.; VORSTER, B.J.; FENTA, B.A.; KIBIDO, T.; DIONISIO, G.; FOYER, C.H. Drought stress responses in soybean roots and nodules. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1015, 2016.
- LI, Y.; LIU, C.; ZHANG, J.; YANG, H.; XU, L.; WANG, Q.; SACK, L.; WUA, X.; HOUA, J.; HE, N. Variation in leaf chlorophyll concentration from tropical to cold-temperate forests: association with gross primary productivity. **Ecological Indicators**, v. 85, p. 383–389, 2018.
- LIU, B.; ZHOU, X.; QU, D. Relationship among seed size from different seed positions at several seeded pod in soybean. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 10, p.768-771, 2012.
- LU, J.; LU, Z.; LI, X.; XU, H.; LI, X. Recycling of Shell Wastes into Nanosized Calcium Carbonate Powders with Different Phase Compositions. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p.223–229, 2015.

- MAHALINGAM, R.; BREGITZER, P. Impact on physiology and malting quality of barley exposed to heat, drought and their combination during different growth stages under controlled environment. **Physiologia Plantarum**, v.165, p.277–289, 2019.
- MALASPINA, P.; MODENESI, P.; GIORDANI, P. Physiological response of two varieties of the lichen *Pseudevernia furfuracea* to atmospheric pollution. **Ecological Indicators**, v. 86, p.27–34, 2018.
- MARCOS-FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado. *In*: KRZYZANOWSKY, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA-NETO, J.B. **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: Abrates, 1999. p.3.1–3.24.
- MARQUES, E. R.; ASSIS, J. G.; BUSTAMANTE, F. O.; ANDRADE, D. B. D.; CARVALHO, M. L.; LOPES, C. A. Distinção de espécies e estádios de maturação de sementes de *Comanthera* spp. por análise de imagem e citometria de fluxo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 11-20, 2019.
- MEDEIROS, A. D.; PINHEIRO, D. T.; XAVIER, W. A.; DA SILVA, L. J.; DOS DIAS, D. C. F. S. Quality classification of *Jatropha curcas* seeds using radiographic images and machine learning. *Ind. Crops Products*, v. 146, p.112162, 2020.
- MEDEIROS, A.D.; PEREIRA, M.D.; SILVA, I.R.F.; CAPOBIANGO, N.P.; FLORES, M.E.P. Vigor of maize seeds determined by a free image analysis system. **Revista Ciência Agronômica**, v.50, n. 4, p.616-624, 2019.
- MEDEIROS, A.D.; PEREIRA, M.D.; SILVA, J.A. Processamento digital de imagens na determinação do vigor de sementes de milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, n.3, p.1-7, 2018. Disponível em: <http://doi:10.5039/agraria.v13i3a5540>
- MELO, L.F.; MARTINS, C.C.; SILVA, G.Z.; BONETI, J.E.B.; VIEIRA, R.D. Beneficiamento na qualidade física e física de sementes de capim-mombaça. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.4, p.667-674, 2016.
- MERTZ, L.M.; HENNING, F.A.; CRUZ, H.L.; MENEGHELLO, G.E.; FERRARI, C.S.; DZIMMER, P. Diferenças estruturais entre tegumentos de sementes de soja com permeabilidade contrastante. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 1, p.023-029, 2009.
- MISHRA, K. B.; MISHRA, A.; NOVOTNÁ, K.; RAPANTOVÁ, B.; HODANOVA, P.; URBAN, O.; KLEM, K. Chlorophyll a fluorescence, under half of the adaptive growth-irradiance, for high-throughput sensing of leaf-water deficit in *Arabidopsis thaliana* accessions. **Plant Methods**, v. 12, n. 1, p. 46, dez. 2016.
- MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 1, p. 15–19, 2006.
- NEVENKA, D.; ČOSIĆ, M.; STRIČEVIĆ, R.; SAVIĆ, S.; DOMAZET, M. Effect of irrigation regime and application of kaolin on yield, quality and water use efficiency of tomato. **Scientia Horticulturae**, v. 201, p. 271–278, 2016.
- NIEVOLA, C. C.; CARVALHO, C. P.; CARVALHO, V.; RODRIGUES, E. Rapid responses of plants to temperature changes. **Temperature**, v. 4, n. 4, p. 371–405, 2017.
- OHLSON, O. C.; KRZYZANOWSKI, F.C; CAIEIRO, J.T.; PANOBIANCO, M. Teste de envelhecimento acelerado de trigo. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 32, n. 4, p. 118-124, 2010.
- OLIOSI, G.; OLIVEIRA, R. J.; FALQUETO, A.R.; PIRES, F.R.; MONTE, J.A.; PARTELLI, F.L. Fluorescência transiente da clorofila a e crescimento vegetativo em cafeeiro conilon sob diferentes fontes nitrogenadas. **Coffee Science**, v.12, p.248–259, 2017.
- OLIVEIRA JÚNIOR, L. F. G.; SANTOS, P. L. de S.; LIMA, R. S. N. de; SILVEIRA, M. P. C.; FAGUNDES, J. L.; CARNELOSSI, M. A. G.; REIS, F. de O. Physiological parameters of cowpea treated with CaO-based particle film and subjected to water restriction. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019.
- OLIVEIRA, A. P.; DINIS, L. T. R.; BARBOSA, N. T. B.; DE MATTOS, E. C.; FONTES, P. T. N.; CARNELOSSI, M. A. G.; FAGUNDES, J. L.; DA SILVA, E. C.; OLIVEIRA JUNIOR, L. F. G. Calcium particle films promote a photoprotection on sweet potato crops

- and increase its productivity. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 9, 2020.
- OLIVEIRA, A. P.; DINIS, L.-T. R.; BARBOSA, N. T. B.; DE MATTOS, E. C.; FONTES, P. T. N.; CARNELOSSI, M. A. G.; FAGUNDES, J. L.; DA SILVA, E. C.; DE OLIVEIRA JUNIOR, L. F. G. Calcium particle films promote a photoprotection on sweet potato crops and increase its productivity. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v.33, n.1, p.29–41, 2021.
- ORT, D. R.; MERCHANT, S. S.; ALRIC, J.; BARKAN, A.; BLANKENSHIP, R. E.; BOCK, R.; CROCE, R.; HANSON, M. R.; HIBBERD, J. M.; LONG, S. P.; MOORE, T. A.; MORONEY, J.; NIYOGI, K. K.; PARRY, M. A. J.; PERALTA-YAHYA, P. P.; PRINCE, R. C.; REDDING, K. E.; SPALDING, M. H.; VAN WIJK, K. J.; VERMAAS, W. F. J.; VON CAEMMERER, S.; WEBER, A. P. M.; YEATES, T. O.; YUAN, J. S.; ZHU, X. G. Redesigning Photosynthesis to Sustainably Meet Global Food and Bioenergy Demand. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America**, v.112, n.28, p.8529–8536, 2015.
- OUKARROUM, A.; SCHANSKER, G.; STRASSER, R. J. Drought Stress Effects on Photosystem I Content and Photosystem II Thermotolerance Analyzed Using Chl *a* Fluorescence Kinetics in Barley Varieties Differing in Their Drought Tolerance. **Physiologia Plantarum**, v. 137, n. 2, p. 188–199, 2009.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences Updated**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.
- PINTO, C. A. G.; CARVALHO, M. L. M.; ANDRADE, D.B.; LEITE, E.R.; CHALFOUN, I. Image analysis in the evaluation of the physiological potential of maize seeds. **Crop Science**, v. 46, n. 2, p 319-328, 2015.
- PINTO, C.A.G.; KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; DOURADO-NETO, D.; SILVA, C. B. DA; MARCOS-FILHO, J. Relationship between size and physiological potential of soya bean seeds under variations in water availability. **Seed Science and Technology**, v. 46, n.3, p. 497-510, 2018.
- PINTO, CRISLAINE A.G.; KRZYZANOWSKI, FRANCISCO C.; FRANÇA-NETO, JOSÉ B.; DOURADO-NETO, DURVAL; SILVA, CLISSIA BARBOZA DA; MARCOS-FILHO, JULIO. Relationship between size and physiological potential of soya bean seeds under variations in water availability. **Seed Science and Technology**, V. 46, N.3, p. 497-510, 2018.
- PORCAR-CASTELL, A.; TYYSTJÄRVI, E.; ATHERTON, J.; VAN DER TOL, C.; FLEXAS, J.; PFÜNDEL, E. E.; MORENO, J.; FRANKENBERG, C.; BERRY, J. A. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 15, p. 4065–4095, 2014.
- RAHMAN, A.; CHO, B.K. Assessment of seed quality using nondestructive measurement techniques: a review. **Seed Science Research**, v. 26, p. 285–305, 2016.
- RIBEIRO, L. K. M. **Análise de imagens de plântulas para a avaliação do potencial fisiológico de sementes de soja**. 2021. 34 p. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos) - Instituto Federal Goiano, Rio Verde-GO, 2021.
- RODRIGUES, M.; GOMES-JUNIOR, F. G.; MARCOS-FILHO, J. Vigor-S: System for Automated Analysis of Soybean Seed Vigor. **Journal of Seed Science**, v. 42, p. 202042039, 2020.
- RODRIGUES, R.R.; PIZETTA, S.C.; SILVA, N.K.C.; RIBEIRO, W.R.; REIS, E.F. Growth initial conilon coffee under water deficit in soil. **Coffee Science**, v. 11, p.33–38, 2016.
- ROLLA, A. L.; NUÑEZ, M. N.; GUEVARA, E. R.; MEIRA, S. G.; RODRIGUEZ, G. R.; ORTIZ DE ZÁRATE, M. I. Climate Impacts on Crop Yields in Central Argentina. Adaptation Strategies. **Agricultural Systems**, v.160, p. 44–59, 2018.
- SAEB, M. R.; RAMEZANI-DAKHEL, H.; KHONAKDAR, H. A.; HEINRICH, G.; WAGENKNECHT, U. A Comparative Study on Curing Characteristics and Thermomechanical Properties of Elastomeric Nanocomposites: The Effects of Eggshell and

Calcium Carbonate Nanofillers. **Journal of Applied Polymer Science**, v.127, n. 6, p. 4241–4250, 2013.

SALIB, N. C. **Respostas fisiológicas de soja à aplicação de caulim e carbonato de cálcio**. 2018. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2018.

SALVUCCI, M. E.; CRAFTS-BRANDNER, S. J. Inhibition of Photosynthesis by Heat Stress: The Activation State of Rubisco as a Limiting Factor in Photosynthesis. **Physiologia Plantarum**, v.120, n.2, p.179–186, 2004.

SAYYAD-AMIN, P.; JAHANSOOZ, M.-R.; BORZOUEI, A.; AJILI, F. Changes in Photosynthetic Pigments and Chlorophyll-a Fluorescence Attributes of Sweet-Forage and Grain Sorghum Cultivars under Salt Stress. **Journal of Biological Physics**, v. 42, n. 4, p. 601–620, out. 2016.

SCHAUBERGER, B.; ARCHONTOULIS, S.; ARNETH, A.; BALKOVIC, J.; CIAIS, P.; DERYNG, D.; ELLIOTT, J.; FOLBERTH, C.; KHABAROV, N.; MÜLLER, C.; PUGH, T.A.M.; ROLINSKI, S.; SCHAPHOFF, S.; SCHMID, E.; WANG, X.; SCHLENKER, W.; FRIELER, K. Consistent negative response of US crops to high temperatures in observations and crop models. *Nat. Commun.* V.8, p.13931,2017.

SCHWALBERT, R. A.; AMADO, T.; CORASSA, G.; POTT, L. P.; PRASAD, P. V. V.; CIAMPITTI, I. A. Satellite-based soybean yield forecast: Integrating machine learning and weather data for improving crop yield prediction in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.284, p.107886, 2020.

SHARKEY, T. D.; ZHANG, R. High Temperature Effects on Electron and Proton Circuits of Photosynthesis. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 52, n. 8, p. 712–722, 2010.

SHARMA, R. R.; REDDY, S. V. R.; DATTA, S. C. Particle films and their applications in horticultural crops. **Applied Clay Science**, v. 116–117, p. 54–68, 2015.

SHELLIE, K. C.; KING, B. A. Kaolin-based foliar reflectant and water deficit influence malbec leaf and berry temperature, pigments, and photosynthesis. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 11, p. 1–24, 2013.

SIEBERS, M. H.; YENDREK, C. R.; DRAG, D.; LOCKE, A. M.; RIOS ACOSTA, L.; LEAKEY, A. D. B.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J.; ORT, D. R. Heat Waves Imposed During Early Pod Development in Soybean (*Glycine Max* L.) Cause Significant Yield Loss Despite a Rapid Recovery from Oxidative Stress. **Global Change Biology**, v. 21, n. 8, p. 3114–3125, 2015.

SILVA, F.W.A.; VIEIRA, H.D.; BARONI, D.F.; MAITAN, M.Q.; ACHA, A.J. Germination performance of Campo Grande (*Stylosanthes capitata/macrocephala*) styler seeds coated with different layers of inert material. **Journal of Experimental Agriculture International**, v.18, n.4, p.1-8, 2017.

SILVA, P. S. O. da; SENA, E. D. O. A.; GONZAGA, M. I. S.; DE OLIVEIRA, L. F. G.; MACIEL, L. B. dos S.; DOS SANTOS, M. P. F.; DE MATTOS, E. C.; DIAS, K. L. L.; CARNEIRO, R. B.; CARNELOSSI, M. A. G. Calcium carbonate particle films and water regimes affect the acclimatization, ecophysiology and reproduction of tomato.

Environmental and Experimental Botany, v. 165, p. 19–29, 2019b.

SILVA, P. S. O.; OLIVEIRA, L. F. G.; GONZAGA, M. I. S.; SENA, E. de O. A.; MACIEL, L. B. dos S.; FIAES, M. P.; MATTOS, E. C. de; CARNELOSSI, M. A. G. Effects of calcium particle films and natural shading on ecophysiological parameters of conilon coffee. **Scientia Horticulturae**, v. 245, p. 171–177, 2019a.

SOARES, M.M.; SANTOS-JUNIOR, H.C.; SIMÕES, M.G.; PAZZIN, D.; SILVA, L.J.

Estresse hídrico e salino em sementes de soja classificadas em diferentes tamanhos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 370-378, 2015.

SOYSTATS. A reference guide to important soybean facts and figures. **American Soybean Association**. 2018 [cited 18 October 2018] [Internet]. Disponível em: <http://soystats.com/>.

- STEIMAN, S.R.; BITTENBENDER, H.C.; IDOL, T.W. Analysis of kaolin particle film use and its application on coffee. **HortScience**, v. 42, p. 1605–1608, 2007.
- STIRBET, A.; LAZÁR, D.; KROMDIJK, J.; GOVINDJEE. Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? **Photosynthetica**, v. 56, n. 1, p. 86–104, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0770-3>
- STRASSER, R. J.; SRIVASTAVA, A.; TSIMILLI-MICHAEL, M. Analysis of the Fluorescence Transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. **Photosynthesis Research**, n. 1, p. 445–483, 2004.
- STRASSER, R. J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; QIANG, S.; GOLTSEV, V. Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis*. **Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics**, v. 1797, n. 6–7, p. 1313–1326, 2010.
- STRASSER, R.J.; SRIVASTAVA, A.; TSIMILLI-MICHAEL, M. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. *In*: YUNUS, M.; PATHRE, U.; MOHANTY, P. (Eds.) **Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation & Adaptation**. London: Taylor & Francis, 2000. pp. 443–480.
- TACARINDUA, C. R. P.; SHIRAIWA, T.; HOMMA, K.; KUMAGAI, E.; SAMESHIMA, R. The effects of increased temperature on crop growth and yield of soybean grown in a temperature gradient chamber. **Field Crops Research**, v. 154, p. 74–81, 2013.
- TEODORO, L. P. R.; BHERING, L. L.; GOMES, B. E. L.; GOMES, B.E.L.; CAMPOS, C. N. S.; BAIO, F. H. R.; GAVA, R. TEODORO, P. E. Understanding the combining ability for physiological traits in soybean. **PLoS One**, v.14, n.12, 2019.
- THUZAR, M.; PUTEH, A.; ABDULLAH, N.A.P.; LASSIM, M.M.; JUSOFF, K. The effects of temperature stress on the quality and yield of soya bean [*Glycine max* L.) Merrill]. **The Journal of Agricultural Science**, v.2, p.172-179, 2010.
- TORRES, S. B.; BALBINO, D. A.; SANTOS, W. G.; NOGUEIRA, N. W.; FREITAS, R. M.; LEITE, M. S. Avaliação do vigor de sementes de rúcula pela atividade respiratória. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 4, p. 561-564, 2016.
- TSAI, M.S.; LEE, T.C.; CHANG, P.T. Comparison of paper bags, calcium carbonate, and shade nets for sunscald protection in “Murcott” tangor fruit. **HortTechnology**, v. 23, p.659–667, 2013.
- VASCONCELOS, M. C.; COSTA, J. C.; OLIVEIRA, A. M. S.; GRANJA, J. A. A.; GUIMARÃES, R. M. Radiography and biometric analysis of broadleaf vegetable seeds. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 61, 2018.
- VENORA, G.; GRILO, O.; SHAHIN, M.A.; SYMONS, S.J. Identification of Sicilian landraces and Canadian cultivars of lentil using an image analysis system. **Food Research International**, Barking, v. 40, p. 161-166, 2007.
- VILELA, A.A.; DEL CLARO, V.T.S. Climate changes affecting biotic interactions, phenology, and reproductive success in a savanna community over a 10-year period. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 12, n. 2, p. 215–227, abr. 2018.
- VINHAL-FREITAS, I.C.; NUNES-JUNIOR, J.E.G.; SEGUNDO, J.P.; VILARINHO, M.S. Germinação e vigor de sementes de soja classificadas em diferentes tamanhos. [Effects of soybean seed size on germination and vigor]. **Agropecuária Técnica**, v.32, p.108-114, 2011.
- WETZEL, C.T. **Efeito do tamanho das sementes de soja**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 1., Londrina, 1978. Anais. Londrina: EMBRAPA, CNPSo, 1978. p.333-341.
- WIJewardana, C.; REDDY, K. R.; ALSAJRI, F. A.; IRBY, J. T.; KRUTZ, J.; GOLDEN, B. Quantifying soil moisture deficit effects on soybean yield and yield component distribution patterns. **Irrigation Science**, v. 36, n. 4–5, p.241–255, 2018.

- XAVIER, J.B.; ANDRADE, D.B.; SOUZA, D.C.; GUIMARÃES, G. C.; RESENDE, L. V.; GUIMARÃES, R. M. Morphological, chemical and physiological characterization of amaranthus spp. **Journal of Seed Science**, v. 41, p.478–487, 2019.
- XAVIER, P.B.; VIEIRA, H.D. Physiological potential of seeds of perennial soybean cv. Comum coated with different materials. **American Journal of Plant Sciences**, v.9, n.1, p.1-12, 2018.
- XIONG, R.; LIU, S.; CONSIDINE, M. J.; SIDDIQUE, K. H. M.; LAM, H.; CHEN, Y. Root System Architecture, Physiological and Transcriptional Traits of Soybean (*GLYCINE MAX L.*) in Response to Water Deficit: A Review. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 405–418, jun. 2021.
- ZHANG, H.; ZHONG, H.; WANG, J.; SUI, X.; XU, N. Adaptive changes in chlorophyll content and photosynthetic features to low light in *Physocarpus amurensis* Maxim and *Physocarpus opulifolius* “Diabolo.” **Peer J**, v. 4, p. 2125, 2016.
- ZHAO, C.; LIU, B.; PIAO, S.; WANG, X.; LOBELL, D. B.; HUANG, Y.; HUANG, M.; YAO, Y.; BASSU, S.; CIAIS, P.; DURAND, J.-L.; ELLIOTT, J.; EWERT, F.; JANSSENS, I. A.; LI, T.; LIN, E.; LIU, Q.; MARTRE, P.; MÜLLER, C.; PENG, S.; PEÑUELAS, J.; RUANE, A. C.; WALLACH, D.; WANG, T.; WU, D.; LIU, Z.; ZHU, Y.; ZHU, Z.; Asseng, S. Temperature Increase Reduces Global Yields of Major Crops in Four Independent Estimates. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 35, p. 9326–9331, 2017.
- ZHENG, H. F.; ZHANG, X.; MA, W.; SONG, J.; RAHMAN, S. U.; WANG, Z. Morphological and physiological responses to cyclic drought in two contrasting genotypes of *Catalpa bungei*. **Environmental and Experimental Botany**, v.138, p.77–87, 2017.
- ZHOU, R.; YU, X.; OTTOSEN, C.; ROSENQVIST, E.; ZHAO, L.; WANG, Y.; YU, W., 2017. Drought stress had a predominant effect over heat stress on three tomato cultivars subjected to combined stress. **BMC Plant Biol.** V.17, P. 24, 2017.
- ZUCHI, J. Refinamento da qualidade de sementes de soja na unidade de beneficiamento. **Rev. Plantar**, v.74, p. 22-23, 2015.

4. ARTIGO 1

Aumentando a produção de soja em regiões de alta intensidade luminosa: revelando o impacto da utilização de filme de partícula à base de cálcio

Periódico que será submetido: Environmental and Experimental Botany

RESUMO

A soja é uma oleaginosa fornecedora de proteínas, essencial para nutrição humana e animal, cultivada em grande parte do mundo. No entanto, em condições de estresses luminoso e de alta temperatura, a cultura pode sofrer danos no aparato fotossintético e ocasionar reduções da produtividade. O objetivo deste trabalho foi implantar a cultura da soja em condições adversas de luz e temperatura obtendo a máxima produtividade com o auxílio do filme de partículas de cálcio. Foi avaliado em duas cultivares de soja: produtividade, trocas gasosas, índices de clorofila, temperatura foliar e fluorescência da clorofila *a* submetidas a quatro concentrações de óxido de cálcio. Para as duas cultivares a aplicação do filme de partículas possibilitou maior produtividade. O efeito da aplicação do filme foi mais significativo na cultivar 57i59RSF IPRO na concentração de 9%, aumentando em 49,47% a produção ao ser comparada com o controle, igualando-se à produtividade da cultivar FTR3191 IPRO sem aplicação de filme. Para cultivar FTR3191 IPRO com a aplicação de 6% apresentou um incremento de 96% na produtividade em relação ao controle. O aumento da produtividade nas duas cultivares relacionou-se ao aumento na taxa fotossintética, aumento das clorofilas e redução da temperatura foliar. O filme proporcionou maior proteção, resultando no aumento do índice de performance e do complexo de evolução de oxigênio, levando a uma menor dissipação de energia. Portanto, o filme de partículas de cálcio é uma ferramenta viável para adaptação e aumento de produtividade da soja em ambientes com alta temperatura e incidências luminosas.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill, temperatura, luminosidade, fluorescência da clorofila *a*, taxa fotossintética, mudanças climáticas.

ABSTRACT

Boosting soybean yield in high light intensity regions: assessing the impact of spraying a calcium-based particle film on leaves

Soybean is an oilseed that provides proteins, essential for human and animal nutrition, and it is grown in much of the world. However, light stress and high temperature conditions can damage the photosynthetic apparatus, causing yield reductions. The objective of this study was to cultivate soybean under adverse light and temperature conditions and obtain maximum yield with the aid of a calcium-based particle film. Yield, gas exchange, chlorophyll indices, leaf temperature, and chlorophyll a fluorescence were evaluated in two soybean cultivars under application of four concentrations of calcium oxide. The application of the particle film led to higher yield in both cultivars. Film application had the most significant effect in the cultivar 57i59RSF IPRO at a concentration of 9%, increasing yield by 49.47% compared to the control, equaling the yield of the cultivar FTR3191 IPRO without film application. For the cultivar FTR3191 IPRO, application of a 6% concentration showed a 96% increase in yield compared to the control. The yield increase in both cultivars was related to the increase in photosynthetic rate, increase in chlorophylls, and reduction in leaf temperature. The film provided greater protection, resulting in an increase in the performance index and the oxygen evolution complex, leading to lower energy dissipation. Therefore, the calcium particle film is a viable tool to adapt to climate change and increase soybean yield in environments with high temperature and light incidence.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill, temperature, luminosity, chlorophyll fluorescence, photosynthetic rate, physiology

4.1. Introdução

Alterações nos fatores ambientais prejudicam o desenvolvimento da soja fazendo com que a produção seja limitada em todo globo (Li et al. 2018). A radiação solar e a temperatura são os fatores abióticos de maior limitação para as plantas (Jiang et al. 2004; Brito et al. 2019), pois influenciam diretamente no máximo rendimento das culturas (Boari et al. 2016; Oliosi et al. 2017; Conde et al. 2018; Zheng et al. 2017; Chen et al. 2019; Brito et al. 2019).

A velocidade nos adventos das mudanças climáticas, a temperatura e a incidência de raios ultravioletas (UV) e infravermelhos (PAR) no planeta vêm aumentando ano a ano e diminuindo o período de chuvas (Kunert et al. 2016, Battisti & Sentelhas, 2017). Segundo Artaxo (2020), o aumento médio de temperatura em áreas continentais ultrapassa 1,5 °C, enquanto o aumento médio global de temperatura é de 1,1 °C, sendo que no Brasil de 1900 a 2017 teve um aumento médio de 1,52 °C e, especificamente no Nordeste brasileiro, o aumento foi mais significativo no Piauí (2,27 °C), Maranhão (2,22 °C), Bahia (2,14 °C), Ceará (2,09 °C), Alagoas (2,11 °C), causando alterações na precipitação, circulação atmosférica, eventos climáticos extremos, aumento do nível do mar e outros. Essas mudanças vêm causando estresses nas espécies vegetais, refletindo em dano no processo fisiológico das plantas, influenciando negativamente o crescimento vegetativo e a produtividade, além de alterar o período e a intensidade das floradas. Devido aos efeitos das mudanças climáticas, as regiões onde eram tradicionais produtoras agrícolas começam a apresentar déficit de produção (Alpino et al. 2022), o que motiva a busca por novas tecnologias que viabilizem a produção agrícola nas regiões mais afetadas.

Na cultura da soja os estresses causados pelas altas temperaturas e excesso de luminosidade atingem diretamente o aparato fotossintético, promovendo a redução das taxas fotossintéticas, pela menor difusão de CO₂ (Iqbal et al. 2019) e menor atividade estomática (Nievola et al. 2017). Nestas situações há também aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) (Dinis et al. 2016a) e fotoinibição (Correia et al. 2005; Taiz et al. 2009; Wang et al. 2018), provocando redução de produtividade (Siebers et al. 2015; Liu et al. 2017).

A implementação de tecnologias alternativas torna-se essencial para minimizar os efeitos deletérios causados pelas mudanças climáticas (Wang & Frei, 2011). Nesse sentido, o uso de filmes de partículas surge como mais uma ferramenta (Sharma et al. 2015), para aliviar o efeito das condições climáticas adversas durante o ciclo das culturas (Oliveira et al. 2022), mitigando os efeitos de altas temperaturas e radiação, por meio da proteção do dossel da planta (Glenn, 2012; Brito et al. 2019), proporcionado pelo sombreamento artificial imposto pelos filmes (Nevenka et al. 2016; Silva et al. 2019a). Essa tecnologia atua no aumento da reflexão do excesso de radiação fotossinteticamente ativa para a cultura (Oliveira Júnior et al. 2019), e isso aumenta a proteção do conteúdo de clorofila (Gharaghani; Javarzari; Vahdati, 2018) e reduz a atividade nos centros de reação (RCs) e absorção de energia (ABS) (Silva et al. 2019a). Além destes benefícios, o sombreamento melhorou a dissipação de energia não fotoquímica da antena do fotossistema II (PSII D10) com base na seção transversal (D10/CS) (Oliveira et al. 2022), alterou o transporte de energia de excitação (ET0) e sua captura (TR0) (Dinis et al. 2016b, 2018a; Silva et al. 2019b). Esses resultados favoreceram o rendimento de diversas culturas (Fahad et al. 2017), como tomate (Silva et al. 2019b), videira (Silva et al. 2019a), batata-doce (Oliveira et al. 2022) e feijão-caupi (Oliveira Júnior et al. 2019).

A produtividade vegetal está correlacionada à eficiência fotossintética que pode ser reduzida quando as plantas são submetidas a algum estresse (Koester, Nohl, Diers & Ainsworth, 2015). Adicionalmente, essa eficiência pode estar diretamente relacionada a características genéticas das cultivares (Jumrani & Bhatia, 2019). Nesse sentido, a busca de respostas quanto ao efeito do uso do filme de partícula em diferentes cultivares se faz necessário. Silva et al. (2019a) verificaram que o filme apresentou efeitos diferentes nas variáveis fisiológicas analisadas para duas cultivares de videira, onde na cultivar Bordô, cultivar mais sensível a altas temperaturas e radiação, o filme teve maior eficiência do que a encontrada na cultivar Isabella,

demonstrando que se fazem necessários mais estudos do efeito do filme em diferentes cultivares da mesma espécie.

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar e comparar a máxima produtividade de duas cultivares de soja 57i59RSF IPRO e FTR3191 IPRO, recomendada e não recomendada para a região, utilizando para isto o filme de partículas de cálcio. Tendo como hipótese que a aplicação do filme de partícula de cálcio trará maior benefício fisiológico para as características consideradas das duas variedades de soja.

4.2. Material e métodos

4.2.1 Área experimental

O estudo foi conduzido na Fazenda Experimental “Campus Rural” da Universidade Federal de Sergipe (UFS), município de São Cristóvão - Sergipe (10° 55’ 25,1’’ S; 37° 12’ 1,8’’ W), Brasil.

O clima é classificado como As, tropical chuvoso, com chuvas concentradas nos meses de abril a setembro, alcançando uma pluviometria média anual de 1.300 mm e temperatura média anual em torno de 25,2 °C, verão seco, segundo a classificação de Köppen (Alvares et al. 2013). O solo da região é classificado como Argissolo, vermelho-amarelo, característico das planícies brasileiras (Oliveira et al. 2017).

4.2.2 Cultivares

A cultivar 57i59RSF IPRO apresenta hábito de crescimento indeterminado, boa arquitetura de planta, alta exigência nutricional, resistente à acamamento, médio índice de ramificação e peso médio de 1.000 sementes de 185 gramas. Apresenta resistência à podridão radicular de *Phytophthora* (Raça 1), ao cancro da haste, à mancha olho de rã e à pústula bacteriana. É uma variedade adaptada às condições de diversas áreas do Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina, até o sul do estado de São Paulo. A outra cultivar, FTR3191 IPRO, apresenta arquitetura moderada, hábito de crescimento indeterminado, com uma exigência nutricional moderada a alta. É uma planta que possui resistência à *Phytophthora sojae*, ao cisto *Heterodera glycines* das Raças 1, 3 e 5, moderada resistência à galha *Meloidogyne incognita* e baixo fator de reprodução da *Rotylenchulus reniformis*. É uma cultivar recomendada para as regiões Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil.

4.2.3 Manejo da irrigação

A irrigação foi realizada por meio de um sistema localizado tipo gotejo, com a finalidade de condicionar a umidade do solo à capacidade de campo. A lâmina de água foi determinada pela evapotranspiração da cultura (ETc) e estimada pelo produto da evapotranspiração de referência (ETo) e Coeficiente de cultura (Kc), de acordo com método de Penman-Monteith (Allen et al. 1998). Os dados meteorológicos relativos à temperatura média do ar, precipitação e insolação foram obtidos da estação meteorológica automática de Aracaju (A-409) do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, localizado a uma distância da unidade experimental de 22 quilômetros. As coletas foram referentes aos meses de setembro a dezembro de 2021 (Figura 1)

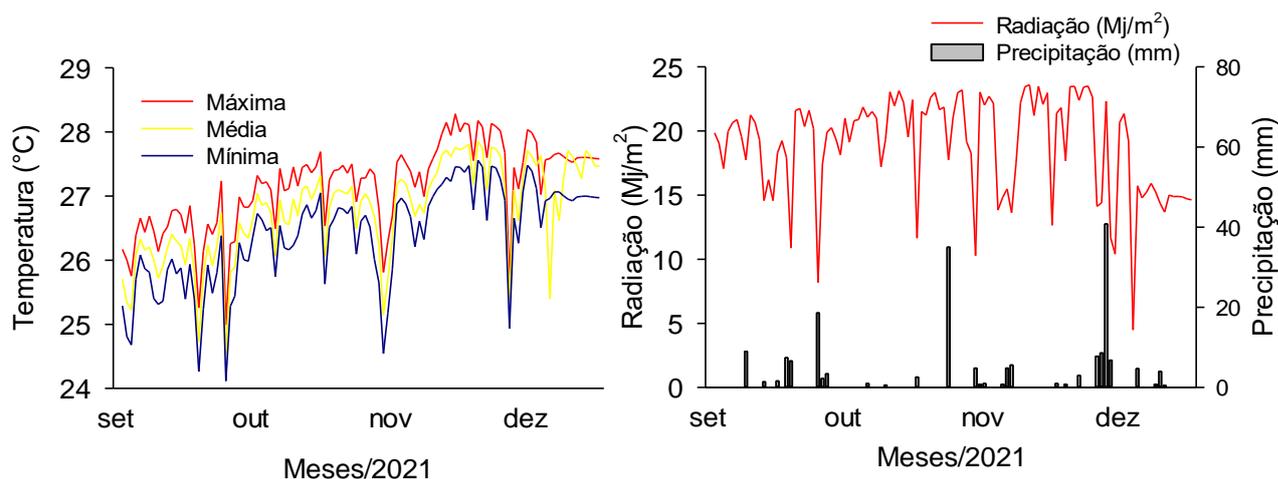


Fig. 1. Temperatura máxima, mínima e média do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar acumulada (MJ m^{-2}) e precipitação acumulada diária (mm) de setembro a dezembro de 2021, da estação meteorológica automática de Aracaju, no estado de Sergipe, Brasil, localizada a uma distância de 20 quilômetros da unidade experimental. Fonte: INMET (2021).

4.2.4 Gerenciamento de culturas

O semeio foi realizado de forma manual, obedecendo uma população de 12 plantas por metro linear. As parcelas foram constituídas de quatro linhas de 3,75 m de comprimento e 0,5 m de espaçamento, em que foram considerados dois metros das duas linhas centrais como parcela útil, desprezando-se a bordadura. A adubação foi realizada durante o plantio ($120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$; $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$), onde o potássio foi parcelado, 1/3 no plantio e 2/3 30 dias após o plantio (DAP), foi utilizado o superfosfato simples e cloreto de potássio como fonte de fósforo e potássio, respectivamente. As sementes foram tratadas com micronutrientes líquidos e, em seguida, foi feita a inoculação utilizando a proporção de 60 g de inoculante (*Bradyrhizobium japonicum*) para 300 ml de solução de micronutrientes. Foi realizada adubação foliar à base de molibdênio, cobre, zinco, boro e magnésio, micronutrientes nos estádios V3-V5 (Sfredo & Oliveira, 2010), usando um volume de calda recomendado pelo fabricante

A aplicação foliar de óxido de cálcio (CaO) iniciou quando as plantas estavam no estágio V5 e foram usadas quatro concentrações (0; 3; 6 e 9%) (Figura 2). Após o preparo, o filme foi aplicado com spray elétrico costeiro (Kawashima PEM-P20), com vazão de $2,9 \text{ L min}^{-1}$ e pressão de 450 kPa, permitindo uma cobertura uniforme das partículas nas plantas que apresentavam uma cobertura de folhas de cor branca. A refletância foi de aproximadamente 90%, com partículas de tamanho $\leq 2 \mu\text{m}$ (Oliveira et al. 2022). A reaplicação ocorreu semanalmente durante todo o ciclo de cultivo, mantendo o valor de luminosidade (L^*) constante (Silva et al. 2019a). Para monitoramento do L^* foi usado um colorímetro digital (Modelo CR 400 Konica Minolta, Japão), para avaliar cinco folhas do dossel da planta (Silva et al. 2019a). Este colorímetro mostra valores de L^* em uma escala de 0 (absorção total de luz) a 100 (reflexão total de luz), indicando as propriedades reflexivas do resíduo de filme. As plantas invasoras foram removidas semanalmente por meio de capina manual.

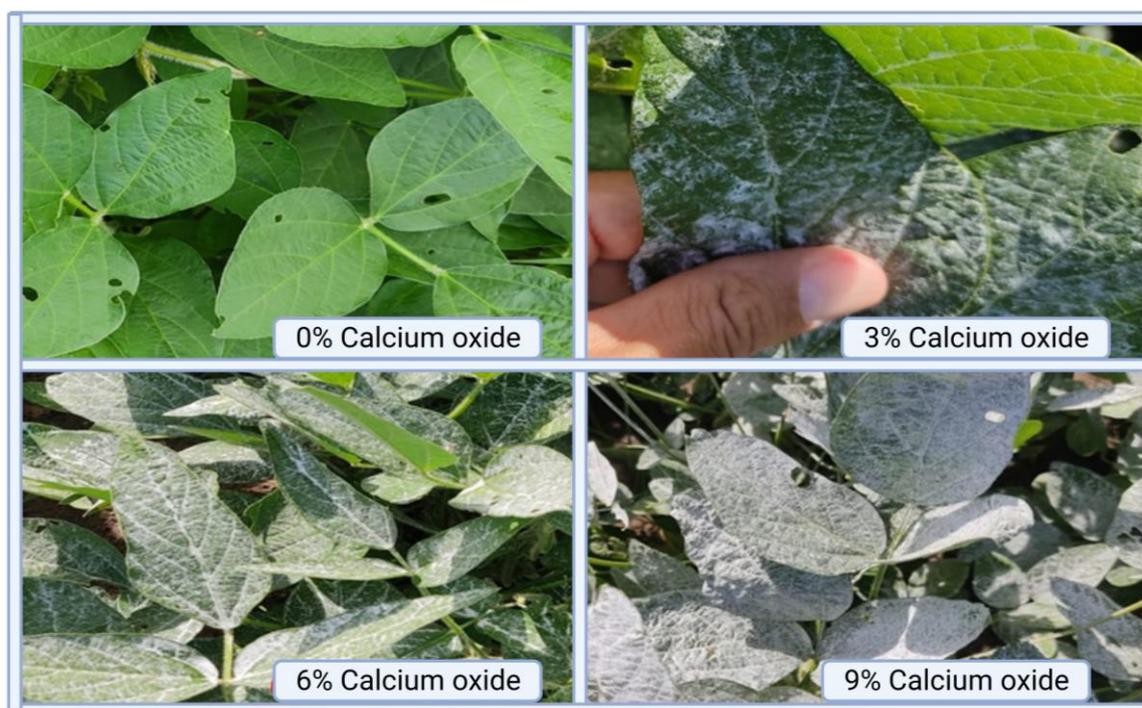


Fig. 2. Folhas de soja tratadas por diferentes concentrações de óxido de cálcio em folhas de plantas de soja. São Cristóvão-SE, 2021.

4.2.5 Produtividade

A produtividade foi estabelecida por meio da pesagem dos grãos colhidos em 1 m no centro de todas as parcelas de cada bloco e então estimada em toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$) (Cotrim et al. 2021).

4.2.6 Análises fisiológicas

4.2.6.1 Taxa fotossintética líquida

As avaliações da taxa de fotossíntese líquida (A , $\mu\text{molCO}_2\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$) ocorreu nos estádios V8 e R5, sendo que as mensurações foram realizadas no período entre 9h e 10h da manhã, utilizando cinco plantas amostradas aleatoriamente de cada unidade experimental. Foi utilizada a terceira folha totalmente desenvolvida a partir do ápice da planta para as mensurações, a qual é considerada diagnóstico para análise nutricional da soja, pois nessa folha é onde ocorre a maior parte do metabolismo de processos responsáveis pela aquisição de energia (Teodoro et al. 2019). As medições foram realizadas com auxílio de um Sistema Portátil de Medição das Trocas Gasosas e fluorescência (IRGA), modelo LI-6400XT (Li-cor, Biosciences Inc Nebraska, USA), calibrado de acordo com as condições climáticas locais no momento da medição com radiação fotossintética ativa (PAR) de $1.500\ \mu\text{mol}\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ e concentração de CO_2 de referência de $400 \pm 2\ \mu\text{mol}\ \text{mol}^{-1}$.

4.2.6.2 Índices de clorofila

Os índices de clorofila *a* (Chl *a*) e clorofila *b* (Chl *b*) foram determinados na terceira folha expandida a partir do ápice, expostas à luz solar (Teodoro et al. 2019). Foram realizadas duas medições em cada planta entre 9h e 10h em folhas saudáveis na terceira folha expandida a partir do ápice nos estádios V8 e R5. Os índices Falker foram obtidos com o medidor portátil de clorofila (modelo ClorofiLOG CFL1030, Falker, Brasil) (Schlichting et al. 2015; Krenchinski et al. 2018).

4.2.6.3 Fluorescência transitória da clorofila *a*

A fluorescência transitória da clorofila *a* foi determinada usando um fluorímetro (modelo OS-30p Opti-Sciences Inc., EUA). As avaliações foram realizadas entre 9h e 10h em folhas saudáveis na terceira folha expandida a partir do ápice nos estádios V8 e R5. As folhas foram adaptadas ao escuro com cliques específicos por 30 min. Após esse procedimento foi induzido um pulso de luz actínica ($\lambda = 660 \text{ nm}$) por 1 s e aplicado homogeneamente em uma área foliar de 4 mm de diâmetro. A última etapa, os estados transitórios, foram induzidos por iluminação máxima de $3.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (fótons) (Oliveira et al. 2022). Foi também determinada a cinética rápida da emissão de fluorescência inicial (F0) até o máximo (Fm). Assim, os seguintes passos da curva OJIP foram: O \cong F0 (50 μ s), J (2 ms), I (30 ms), P \cong Fm, o tempo para emissão máxima de fluorescência t (Fm) e a área acima da curva OJIP (A). Com os resultados da curva OJIP, os parâmetros biofísicos, Fluxo de fótons absorvidos (ABS) por seção transversal PSII excitada (CS) de fluorescência inicial (ABS/ CS), Fluxo máximo de elétrons energizados aprisionados pela seção transversal do PSII na fluorescência inicial (TR/ CS), Fluxo de elétrons de QA para PQ por seção transversal PSII em fluorescência inicial (ET/ CS), Fluxo de elétrons excitados de aceitadores PSI finais QA para seção transversal PSII em fluorescência máxima (RE/CS), Dissipação de energia não fotoquímica em todas as seções PSII (DI/CS), Índice de Desempenho em base de absorção (PIabs) e RC/CS foram calculados usando equações para o teste JIP (Oliveira et al. 2022).

4.2.7 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com parcelas subdivididas no tempo constituídas por três repetições onde as parcelas corresponderam às concentrações do filme de partículas à base de cálcio (0; 3; 6; 9%) e as subparcelas às fases de avaliação (vegetativa - estádio V8 e reprodutiva - estádio R5). As parcelas foram constituídas de quatro linhas de 3,75 m de comprimento e 0,5 m de espaçamento, em que foram considerados dois metros das duas linhas centrais como parcela útil, desprezando-se a bordadura.

4.2.8 Análise estatística

Os dados foram posteriormente analisados usando uma matriz de correlação. Os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) foram calculados para todas as combinações de dados fisiológicos e produtivos usando o software R versão 4.3.0. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para a realização da análise estatística foi utilizado o software estatístico SISVAR 5.0 (Ferreira, 2011). A plotagem dos gráficos foi realizada utilizando o software SigmaPlot 12.5 (Software da Systat, San Jose, CA, EUA).

4.3. Resultados

4.3.1 Temperatura do ar e foliar

A cultivar FTR3191IPRO (cultivar 1 - Recomendada) apresentou as maiores diferenças de temperatura entre o ar e a folha, tanto na fase vegetativa quanto na fase reprodutiva, para a concentração de 6% do filme de partículas de CaO (Figura 3-A). Essa diferença entre temperatura do ar e a foliar em relação ao controle foi de 55,12 e 30,65% para a fase vegetativa e reprodutiva, respectivamente. Para a cultivar 57i59RSF IPRO (cultivar 2 - Não Recomendada), a maior diferença foi verificada com a aplicação do filme a 9% com 42,18 e 129,64% quando comparadas ao controle na fase vegetativa e reprodutiva, respectivamente (Figura 3-B). As diferenças nas temperaturas apresentadas pelas cultivares está diretamente relacionada à camada embranquecida que o filme com partículas de CaO deixa na folha, representada pelo valor de L*: 62.08 e 72.71 para 6 e 9% de aplicação do filme, respectivamente, onde totalmente branco representa 100.00.

4.3.2 Índices de clorofila

O filme de partícula também favoreceu a proteção e manutenção dos pigmentos clorofilianos contra a degradação pela luz e temperatura (Figura 4). Com o uso do filme, a cultivar 1 proporcionou um aumento significativo nos valores médios dos índices de Chl *a* na fase vegetativa, destacando-se a concentração de 6%, com incremento de 13,1% quando comparado ao controle (Figura 4-A). Em relação à fase reprodutiva, houve efeito de proteção com aplicação do filme quando comparado ao controle, contudo, a variação entre os tratamentos foi menor. A cultivar C2 apresentou incremento no índice de clorofila apenas na concentração de 9% na fase vegetativa. Enquanto na fase reprodutiva todas as concentrações do filme foram maiores quando comparadas ao controle (Figura 4-B). Para as duas cultivares as maiores concentrações de clorofila *a* foram verificadas na fase reprodutiva (com exceção do controle da C2). A Chl *b* não foi influenciada com o uso do filme (Figura 5-A) para a cultivar 1, contudo, de forma geral, essa cultivar apresentou teores de Chl *b* superiores na fase reprodutiva. Para a cultivar 2, tanto na fase vegetativa quanto reprodutiva, houve aumento da Chl *b* com o aumento da concentração do filme (Figura 5-B), não diferindo entre as fases.

4.3.3 Taxa de fotossíntese líquida

O sombreamento artificial promovido pelo filme de partículas influenciou na fotossíntese líquida (A) para as duas cultivares (Figura 6). Com relação à cultivar recomendada (cultivar 1), verificou-se que o melhor desempenho foi apresentado pelas plantas com aplicação de filme na concentração de 6% de CaO que obtiveram aumento na taxa fotossintética de 64,14 e 22,34% nas fases vegetativa e reprodutiva, respectivamente, quando comparado ao controle (Figura 6-A). Para a cultivar não recomendada (cultivar 2), houve um aumento linear com o aumento da concentração do filme durante a fase vegetativa (Figura 6-B), chegando a 173,43% com o filme a 9% quando comparado ao controle. Durante a fase reprodutiva a fotossíntese se manteve constante para as concentrações de 0, 3 e 6%, e com significativo aumento de 57,35% com filme de 9% em relação ao controle.

4.3.4 Fluorescência transitória da clorofila *a*

Na fase vegetativa, na cultivar 1 o tratamento controle apresentou maiores valores de O, K, J e I na avaliação de fluorescência variável (OKJIP). Enquanto, para a banda P, o maior valor foi encontrado nas concentrações de 3 e 6% de CaO (Figura 7-A e B). Quanto à fase reprodutiva, o controle apresentou resultado semelhante ao encontrado na fase vegetativa exceto para a banda P, onde o controle e a concentração a 3% de CaO não diferiram OU não tiveram diferença estatística (Figura 7-B).

Na cultivar 2, o filme de partícula também influenciou na curva da fluorescência variável da clorofila *a*, apresentando as menores inclinações ao comparar os tratamentos com aplicações do filme de CaO ao controle, tanto na fase vegetativa quanto na reprodutiva (Figura 8-A e B). Esse efeito foi mais evidente na fase vegetativa, principalmente na banda K, J e I, sendo que a concentração 9% demonstrou o menor valor, enquanto na banda P apresentou maior valor (Figura 8-A). Na fase reprodutiva ficou evidente a distinção de dois grupos, com maiores valores para o controle e 3% e com menores para 6 e 9%.

A cultivar 1, nas concentrações a 3 e 6% de CaO, apresentaram os melhores resultados para PIabs e OEC tanto na fase vegetativa quanto reprodutiva (Figura 9-A). Quanto à cultivar 2, observou-se incremento conforme aumentou-se a concentração do filme, com maiores valores observados na concentração a 9% de CaO (Figura 9-B), tanto na fase vegetativa quanto na fase reprodutiva para PIabs e OEC. Em ambas as cultivares os maiores valores de PIabs e OEC foram observados na fase vegetativa.

Ao analisar os fluxos fenomenológicos de energia por seção transversal (CS) em folhas da cultivar 1, verificou-se que as concentrações de filme influenciaram nos resultados alcançados quanto ao fluxo de elétrons. Analisando o efeito do filme entre as fases foi possível

observar que a vegetativa foi superior na maioria das variáveis, sendo que a concentração a 6% de CaO apresentou maiores valores para as variáveis analisadas, ABS/CS, TR/CS e ET/CS com 45,75, 41,18 e 36,52% ao comparar com a fase reprodutiva. Embora que TR/CS e ET/CS a 9% não se diferenciaram estatisticamente entre as fases (Figura 10). Para a variável RE/CS, a fase reprodutiva destacou-se da fase vegetativa no controle, na DI/CS, o controle e a concentração a 3% foi significativamente superior na fase reprodutiva, enquanto nas concentrações a 6 e 9% não diferiram. Quanto ao efeito das concentrações dentro de cada fase, observou-se que a aplicação do filme apresentou uma redução para todas as variáveis analisadas tanto para a fase vegetativa quanto para a reprodutiva, ao comparar com o controle, exceto para RE/CS na fase vegetativa que não apresentou significância.

Na cultivar 2 verificou-se que as concentrações de CaO influenciaram tanto na fase vegetativa quanto na reprodutiva (Figura 11). Ao analisar o efeito do filme entre as fases, observou-se que as concentrações a 6 e 9% de CaO proporcionaram maiores valores no fluxo de absorção de energia (ABS/CS: 58,14 e 22,49%), de aprisionamento (TR/CS: 50,80 % e 18,23%), transporte de elétrons (ET/CS: 37,91 e 13,99%) em cada concentração, respectivamente, na fase vegetativa ao comprar com a reprodutiva. Ao analisar o fluxo de energia através da seção transversal entre as concentrações, foram observados menores valores de ABS/CS, TR/CS, ET/CS, RE/CS e DI/CS para 9% de CaO na fase vegetativa quando comparado ao controle (ABS/CS 28,88%, TR/CS 25,40%, ET/CS 1,12%, RE/CS 11,74% e DI/CS 38,71%). Na fase reprodutiva os menores valores foram verificados na ABS/CS, TR/CS e RE/CS a 6% de CaO, e a 9% para a ET/CS e DI/CS (ABS/CS 38,86%, TR/CS 38,69%, RE/CS 40,23%, ET/CS 39,88 e DI/CS 41,30%).

4.3.5 Produtividade

A produtividade de soja na cultivar 1 resultou em um incremento de 96% utilizando a concentração a 6% de CaO quando comparado ao controle (Figura 12). Para a cultivar 2 observou-se que a produtividade incrementou à medida que a concentração do filme aumentou com 26,84%, 26,31% e 49,47% para os filmes de 3, 6 e 9%, respectivamente, em relação ao controle. Outro ponto que chamou a atenção quanto à produtividade foi que a cultivar 2, com aplicação de filme de partícula a 9% ($2.85 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), atingiu patamares de produtividade da cultivar 2 ($2.84 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) recomendada para a região, sem aplicação de filme.

Ao verificar a análise correlativa pode se observar que a fase vegetativa para a cultivar 1 teve alta correlação positiva entre os parâmetros *A*, *Chl a*, *Chl b*, OEC, TemDIF e Prod (Figura 13), porém na fase reprodutiva observou-se que o filme não foi tão eficiente, embora tenha apresentado correlação positiva entre a produtividade, taxa fotossintética e a diferença de temperatura entre a folha e o ar (Figura 14). Para a cultivar 2 na fase vegetativa como na cultivar 1 também foi verificada forte relação positiva entre esses parâmetros (Figuras 15 e 16).

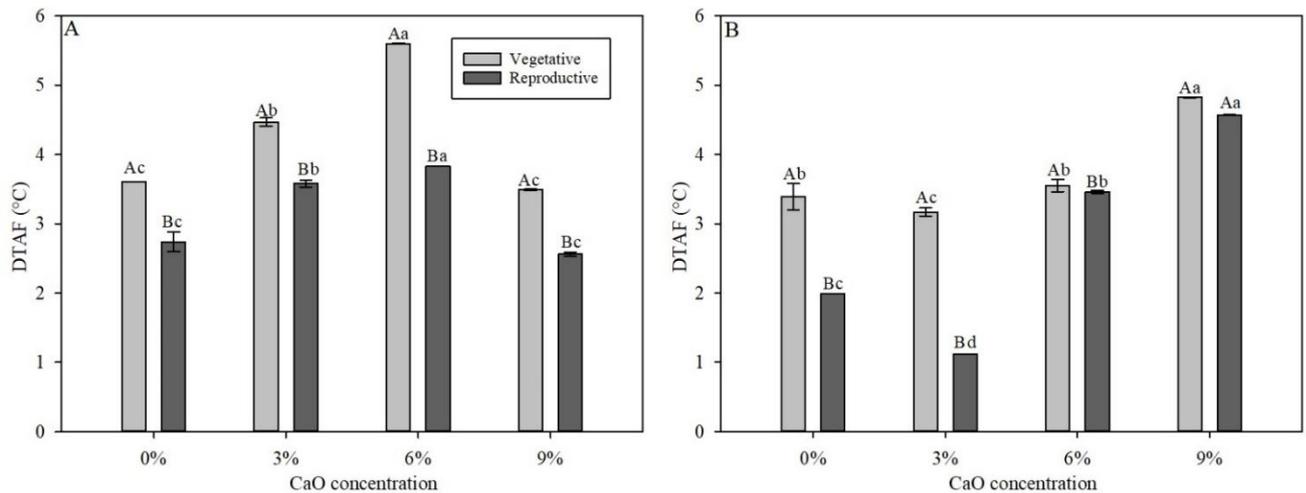


Fig. 3. Diferença da temperatura foliar e do ar da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B) nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO). Sendo que o valor de L^* foi 39,26; 53,08; 62,08 e 73,66% para o controle, 3, 6 e 9% de CaO. As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada dose (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao desvio padrão.

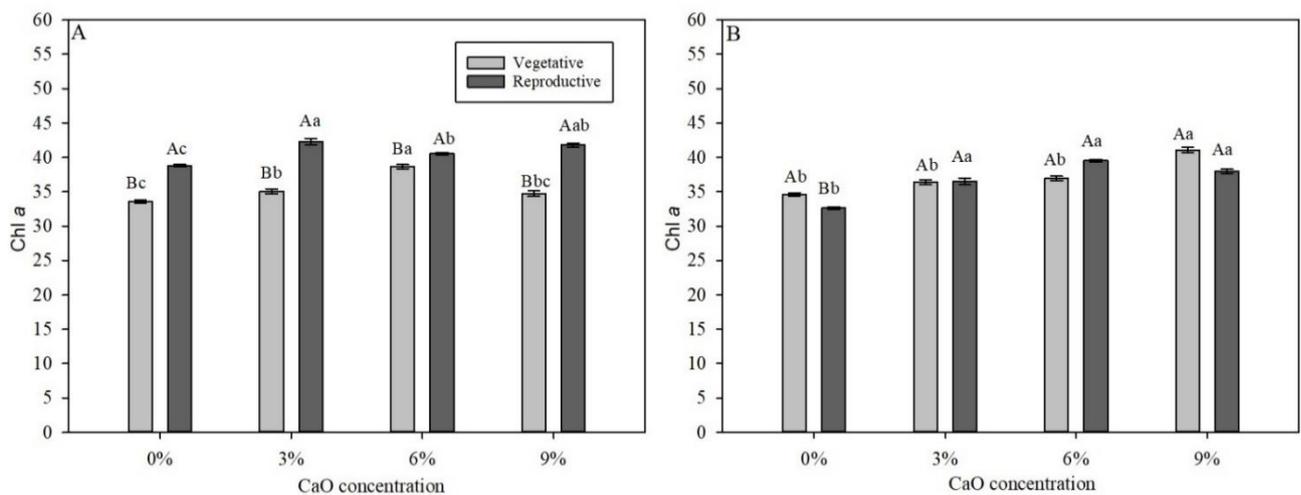


Fig. 4. Clorofila *a* da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B), nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das concentrações dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada concentração (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão.

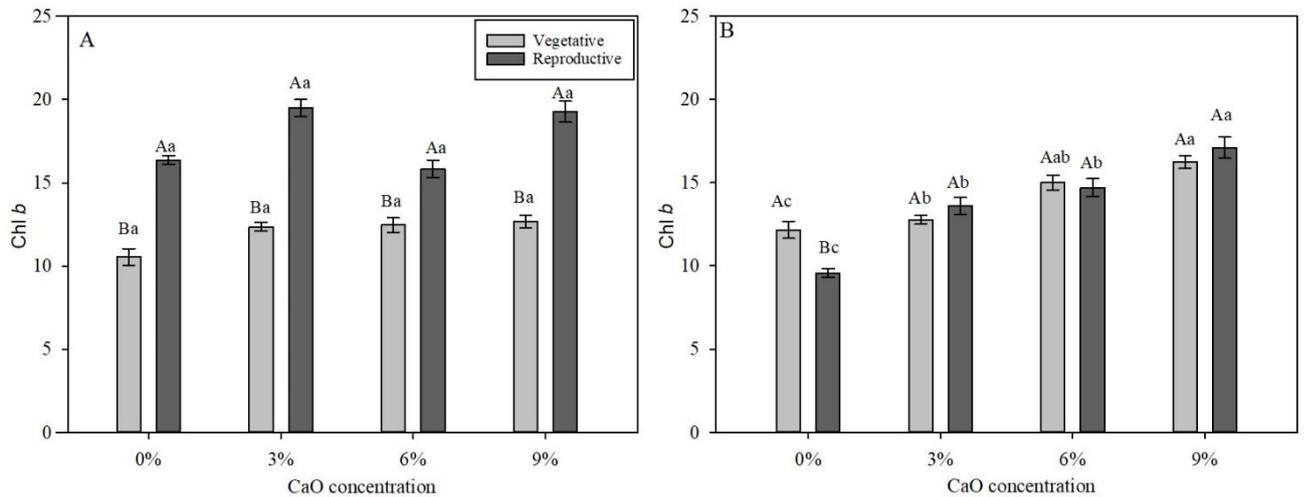


Fig. 5. Clorofila *b* da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B), nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das concentrações dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada concentração (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão.

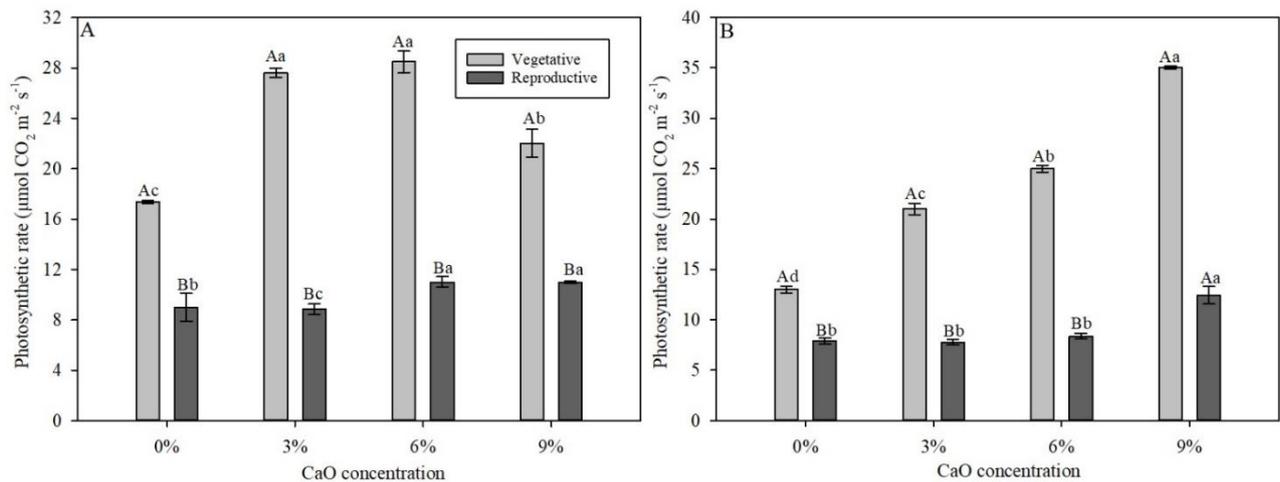


Fig. 6. Taxa fotossintética da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B) nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das concentrações dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada concentração de filme de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO) (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão.

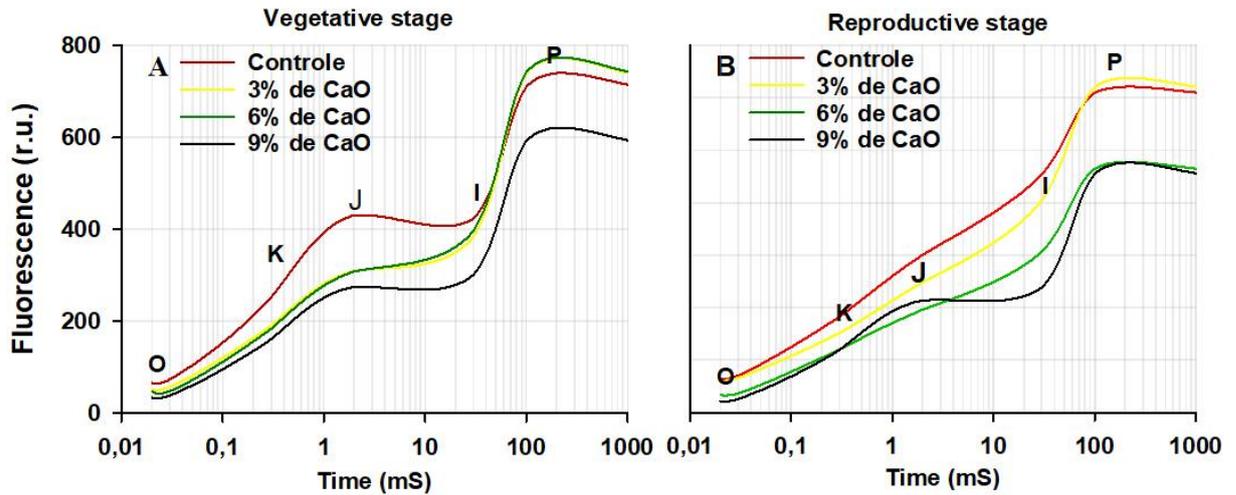


Fig. 7. Fluorescência variável da clorofila *a* na cultivar 1 submetida a diferentes doses de CaO em duas fases, vegetativa (A) e reprodutiva (B). O transiente foi duplamente normalizado entre os passos O amostrado a 50 μ s e P, geralmente atingido em torno de 200 ms. A emissão de fluorescência normalizada dupla OP é indicada como V. As etapas intermediárias J e I, amostradas em 2 e 30 ms, respectivamente.

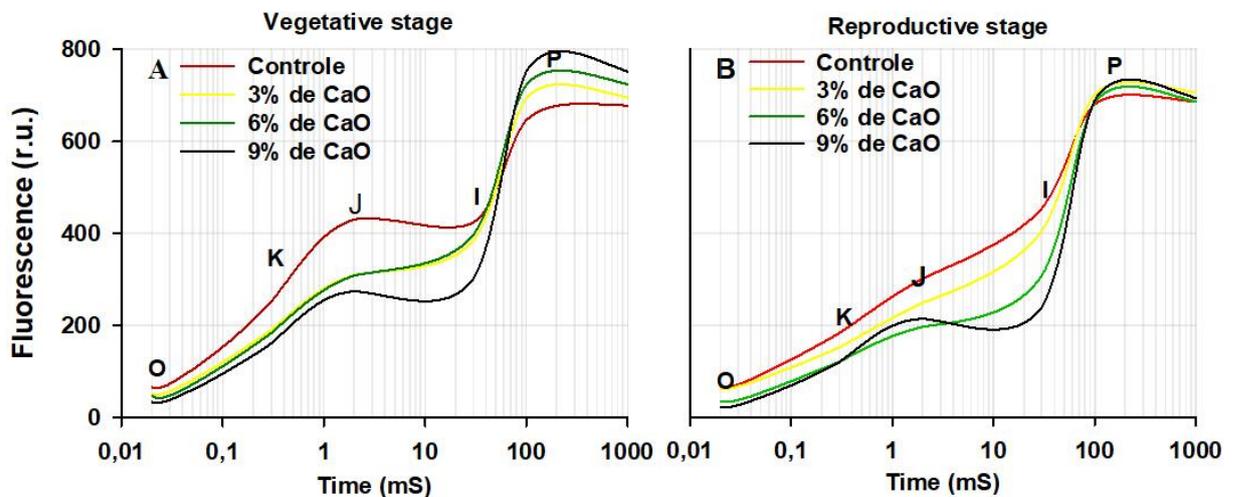


Fig. 8. Fluorescência variável da clorofila *a* na cultivar 2 submetida a diferentes doses de CaO em duas fases, vegetativa (A) e reprodutiva (B). O transiente foi duplamente normalizado entre os passos O amostrado a 50 μ s e P, geralmente atingido em torno de 200 ms. A emissão de fluorescência normalizada dupla OP é indicada como V. As etapas intermediárias J e I, amostradas em 2 e 30 ms, respectivamente.

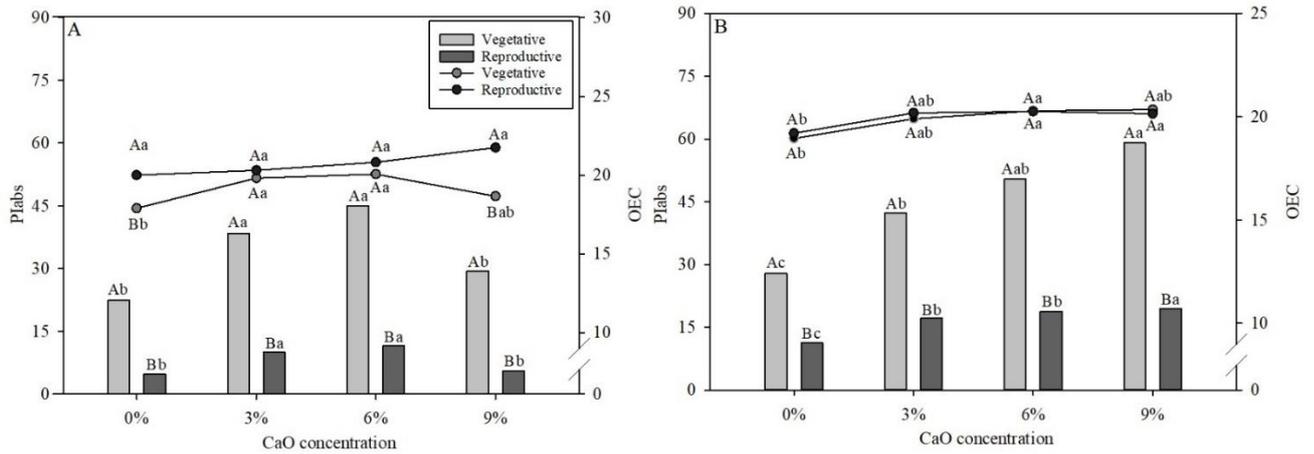


Fig. 9. PIabs e OEC da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B) nas fases vegetativa e reprodutiva, após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO), sendo que o PIabs está representado em barras e OEC em linha. As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das concentrações dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada concentração de filme de partículas de cálcio (3, 6 e 9% de CaO) (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão.

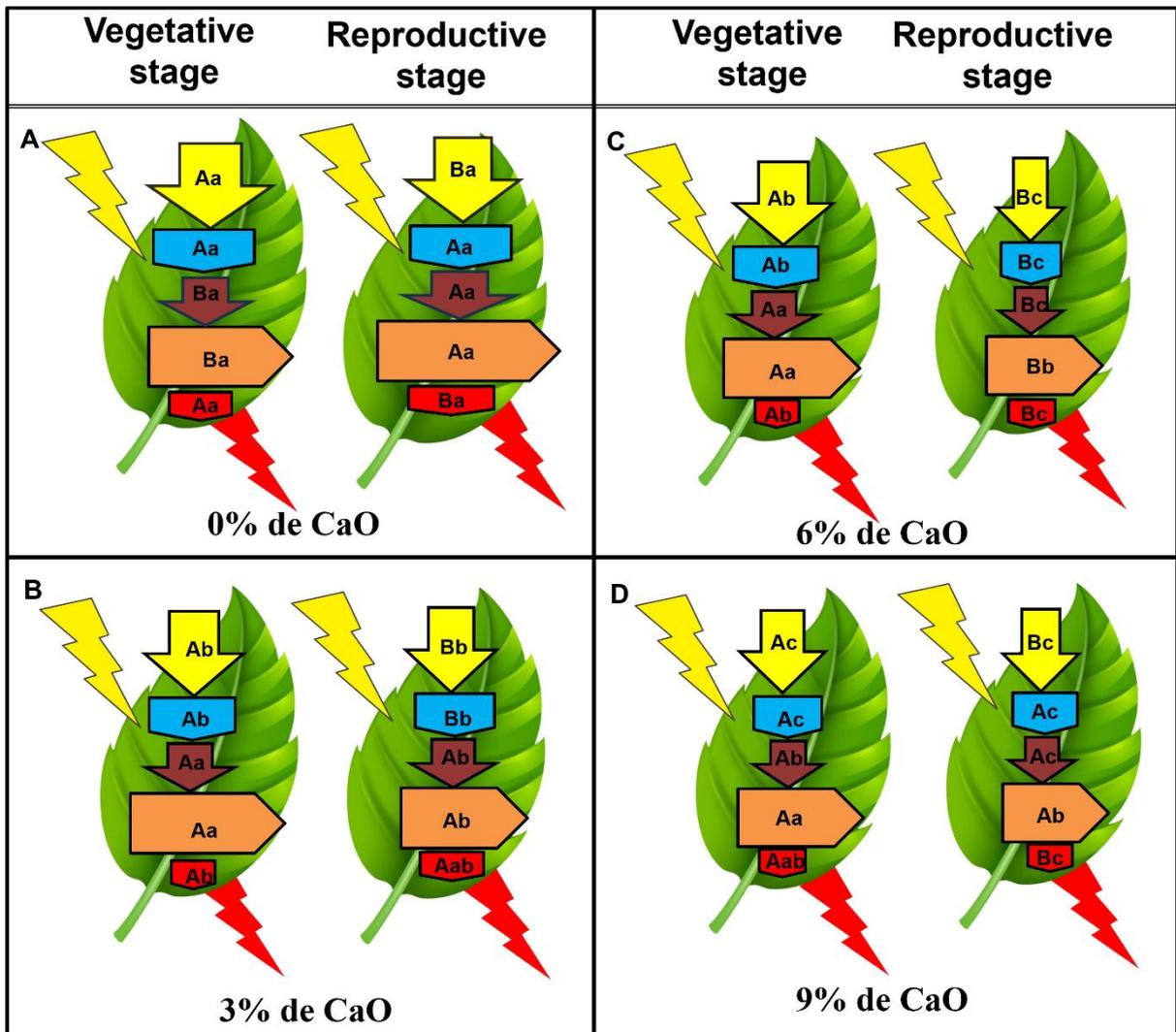


Fig. 10. Modelo foliar mostrando fluxos fenomenológicos de energia por seção transversal excitada (CS) em folhas da cultivar 1 em diferentes doses de filme à base de CaO (0%: A; 3%: B; 6%: C e 9%: D) na fase vegetativa e reprodutiva. Cada valor relativo dos parâmetros medidos é uma média ($n = 3$) e a largura de cada seta corresponde à intensidade do fluxo. Seta amarela – ABS/CS, fluxo de absorção por CS; seta azul – TR/CS, fluxo de energia aprisionado por CS; seta marrom – ET/CS, fluxo de transporte de elétrons por CS; laranja – RE/CS, fluxo de elétrons excitados de QA até os aceptores finais do PSI por seção transversal de PSII; seta vermelha – DI/CS, fluxo de energia dissipada por CS. As médias seguidas pela mesma letra minúscula (todas as colunas em doses diferentes) e maiúscula (para comparar as fases) para cada parâmetro não são significativamente diferentes umas das outras usando o teste LSD ($P \leq 0,05$).

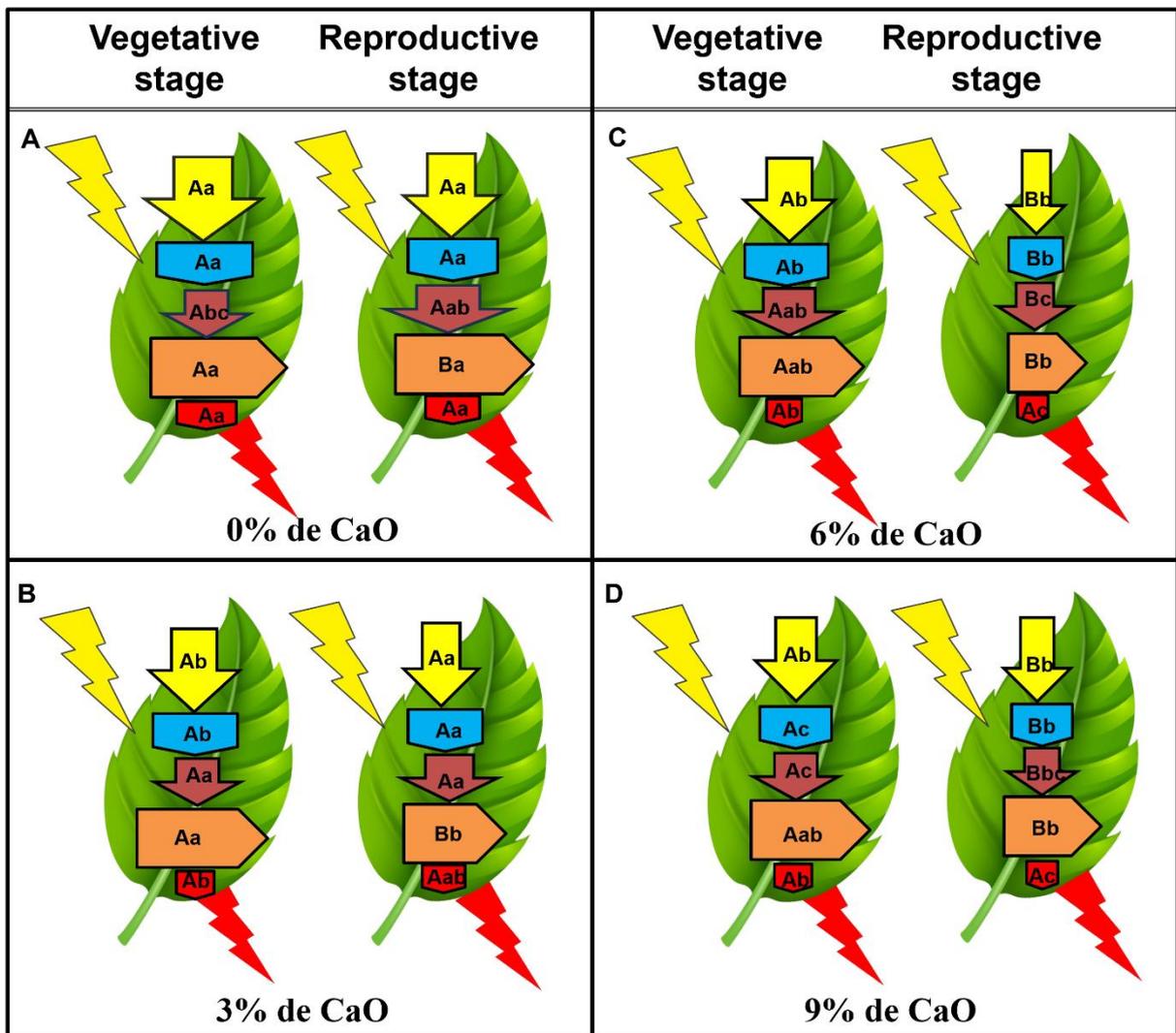


Fig. 11. Modelo foliar mostrando fluxos fenomenológicos de energia por seção transversal excitada (CS) em folhas da cultivar 2 em diferentes doses de filme à base de CaO (0%: A; 3%: B; 6%: C e 9%: D) na fase vegetativa e reprodutiva. Cada valor relativo dos parâmetros medidos é uma média ($n = 3$) e a largura de cada seta corresponde à intensidade do fluxo. Seta amarela – ABS/CS, fluxo de absorção por CS; seta azul – TR/CS, fluxo de energia aprisionado por CS; seta marrom – ET/CS, fluxo de transporte de elétrons por CS; laranja – RE/CS, fluxo de elétrons excitados de QA até os aceptores finais do PSI por seção transversal de PSII; seta vermelha – DI/CS, fluxo de energia dissipada por CS. As médias seguidas pela mesma letra minúscula comparam doses e maiúscula comparam fase vegetativa para cada parâmetro não são significativamente diferentes umas das outras usando o teste LSD ($P \leq 0,05$).

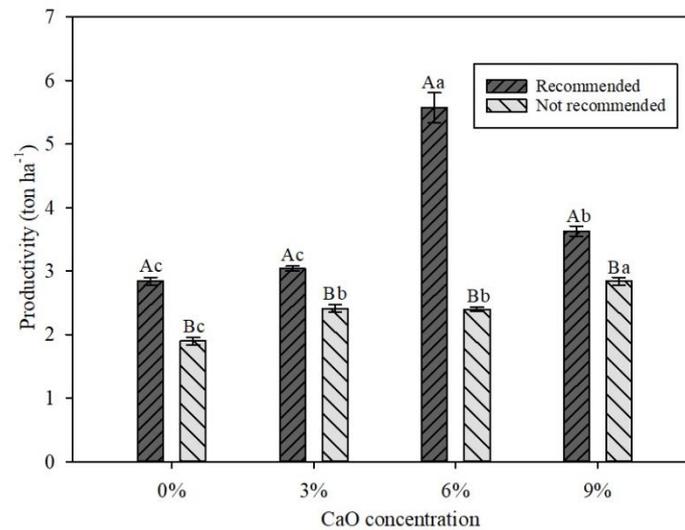


Fig. 12. Rendimento da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) da cultivar 1 e cultivar 2 em tonelada por hectare ($t \cdot ha^{-1}$), após a aplicação de filmes de partículas de cálcio (0, 3, 6 e 9% de CaO). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada dose (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão.

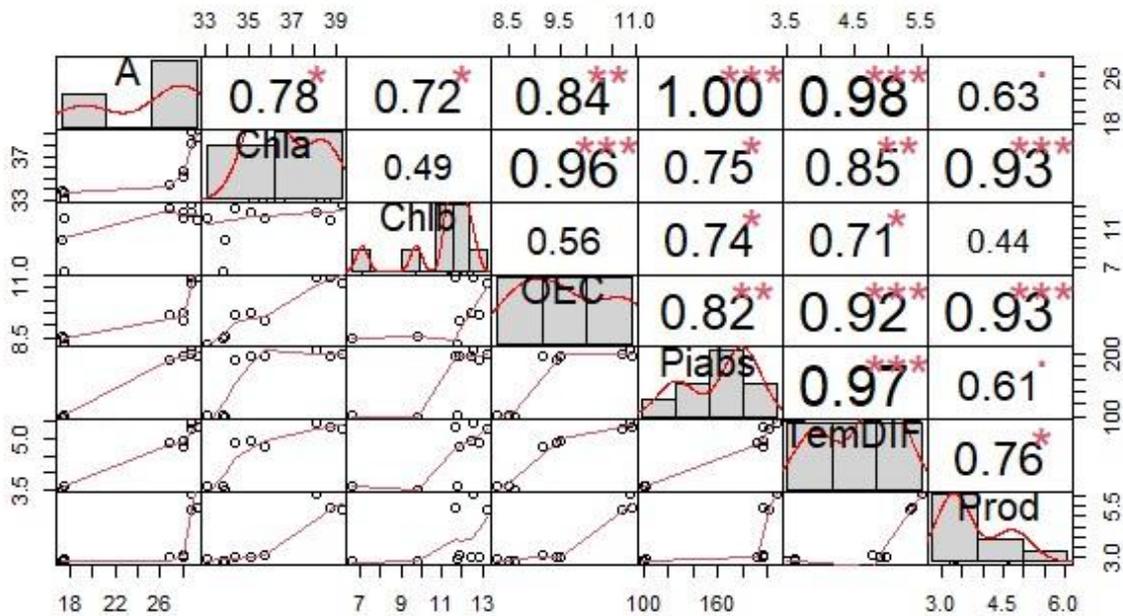


Fig. 13. Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson dos parâmetros fotossintéticos na cultivar 1 submetida a diferentes doses de CaO na fase vegetativa.

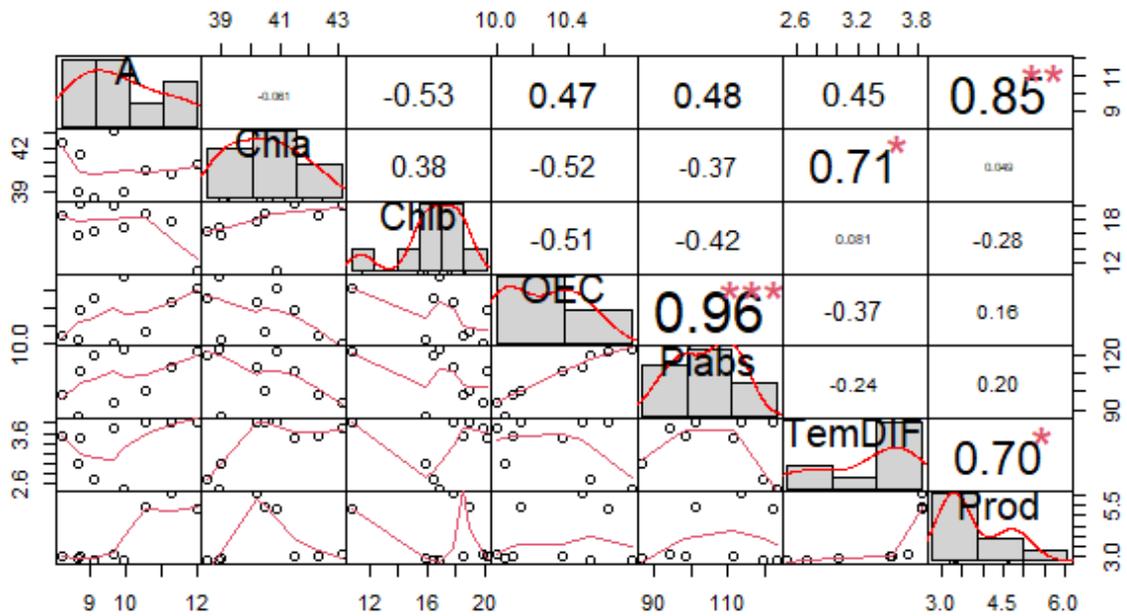


Fig. 14. Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson dos parâmetros fotossintéticos na cultivar 1 submetida a diferentes doses de CaO na fase reprodutiva.

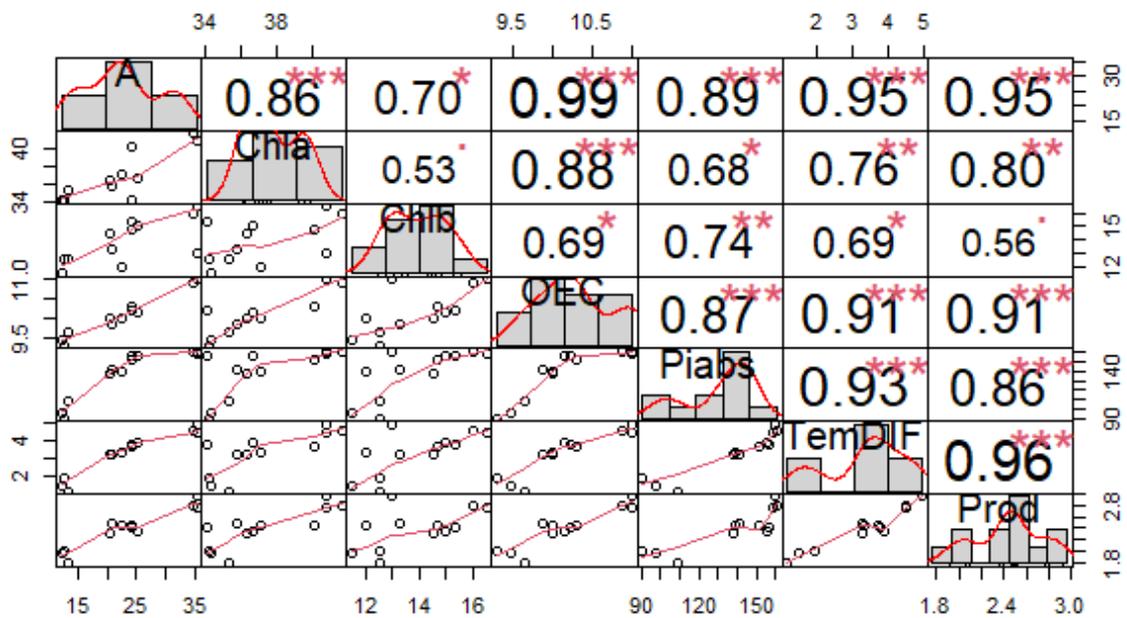


Fig. 15. Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson dos parâmetros fotossintéticos na cultivar 2 submetida a diferentes doses de CaO na fase vegetativa.

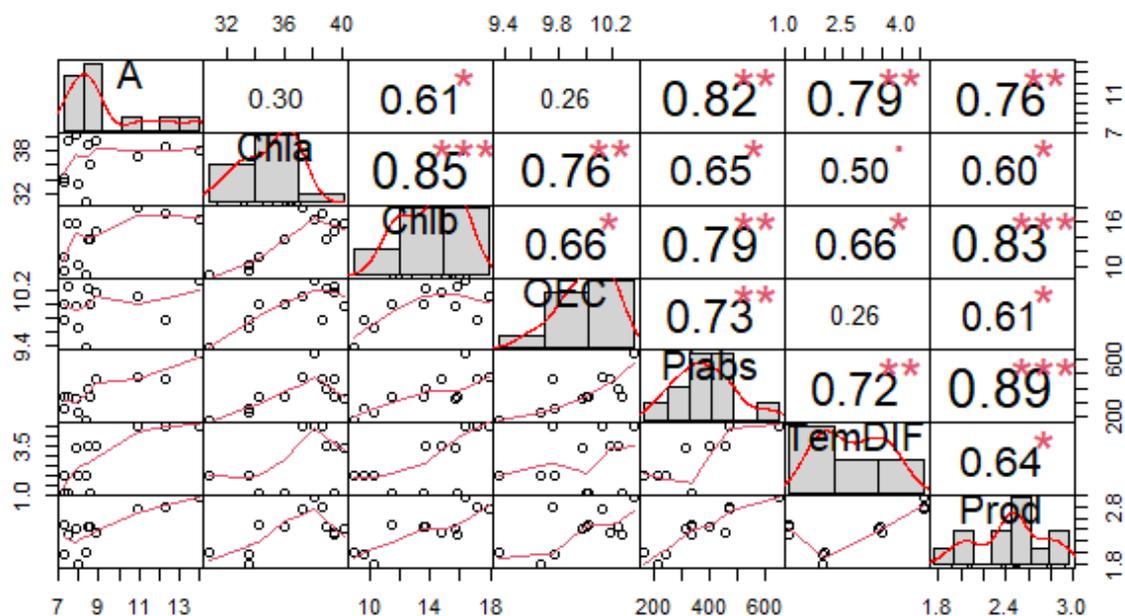


Fig. 16. Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson dos parâmetros fotossintéticos na cultivar 2 submetida a diferentes doses de CaO na fase Reprodutiva.

4.4. Discussão

Ao utilizar duas cultivares de soja, na cultivar 2 (não recomendada às condições regionais) e na cultivar 1 (recomendada às condições regionais) foi observado que aquela recomendada para as condições climáticas se destacou em termo de produtividade sem o uso de filme, com uma produção de 2,84 t. ha⁻¹ (recomendada) e 1,90 t. ha⁻¹ (não recomendada). Além deste resultado, verificou-se que a cultivar não recomendada para a região com a aplicação do filme a 9% obteve uma produtividade aproximada à cultivar recomendada sem filme, com uma produção de 2,85 t. ha⁻¹ e 2,84 t. ha⁻¹, respectivamente. Em se tratando de uma cultivar recomendada para a região, a aplicação de doses crescentes de filmes de partículas de cálcio aumentou a produtividades das plantas, no entanto na última dose (9%) as plantas não responderam tão bem quanto para 6%, ou seja, com 9% não houve expressão do potencial máximo.

Possivelmente, o que levou as plantas tratadas com 9% a não expressarem seu máximo potencial foi o excesso de fotoproteção para uma planta recomendada e que se mostra adaptada às condições climáticas da região. Na concentração de 6% de cálcio houve eficiência nos processos fotossintéticos na cultura da soja, promovendo adaptações ao metabolismo fotossintético, como controle do estresse fotoxidativo, manutenção de compostos antioxidantes e proteção do fotossistema II (PSII), resultando em maior taxa fotossintética líquida (Silva et al. 2019a; Silva et al. 2019b). Assim, o uso de filme à base de cálcio contribui para melhorar as características fisiológicas das plantas de soja, corroborando com os resultados obtidos em outras culturas como café conilon (Silva et al. 2019c), tangerina (Boari et al. 2015), feijão caupi (Oliveira Júnior et al. 2019), *Solanum lycopersicum* (Boari et al. 2016; Silva et al. 2019b), *Vitis labrusca* (Silva et al. 2019a), *Ipomeia batatas* (Oliveira et al. 2022) e *Malus domesticus* (Glenn, 2016). Esse reflexo positivo foi também observado nas correlações positivas entre as variáveis, produtividade, índice de desempenho, taxa fotossintética, clorofila e fluorescência transitória, demonstrando o efeito benéfico do filme na cultura da soja.

A região Nordeste do Brasil é caracterizada por apresentar altas temperaturas e radiação solar e baixa precipitação pluviométrica, característica essa apresentada durante a realização do experimento (Figura 3). Dessa forma, o uso de estratégias para minimizar os efeitos deletérios

ocasionados pelos fatores abióticos que possam contribuir para reduzir o efeito das elevadas temperaturas do ar em relação à temperatura foliar, a exemplo do uso de filme de partícula, são bem-vindos (Boari et al. 2016; Dinis et al. 2018b). O filme de partícula apresenta um efeito reflexivo (Kok & Bal, 2018) com a capacidade de refletir a radiação fotossintética ativa (PAR), ultravioleta e infravermelho (Brito et al. 2019; Dinis et al. 2018), caracterizando um efeito fotoprotetor, resultando em maior rendimento das plantas.

O aumento na produtividade da cultivar 2 tratada com 9% de filme de cálcio foi uma consequência direta do sombreamento artificial promovido pelo filme ($L^* = 72.71$), ou seja, uma fotoproteção para uma planta C3 não adaptada a um ambiente estressante com alta taxa de radiação luminosa. Além da redução da radiação, a temperatura foliar também foi reduzida em aproximadamente 1,43 °C na fase vegetativa e 2,6 °C na fase reprodutiva, comparado ao controle. Da mesma forma, a cultivar recomendada com aplicação do filme na concentração de 6% impôs uma redução da absorção de energia luminosa e redução da temperatura foliar pelo sombreamento (Gharaghani et al. 2018). Esses resultados demonstram um efeito fotoprotetor do filme nas duas cultivares, promovendo reflectância, reduzindo a radiância fotossintética ativa (PAR), radiância ultravioleta (UV) e radiação infravermelha, bem como a energia radiante absorvida, sendo que o efeito foi mais evidente na fase vegetativa. Esses resultados estão em consonância com os resultados observados para diferença entre a temperatura foliar e a temperatura ambiente (Figura 3) e Plabs (Figura 9), onde o filme atuou como um termorregulador e fotoprotetor, diminuindo a temperatura e o excesso de radiação. Isso levou a redução da absorção de energia, evitando estresse luminoso e garantindo assim maior eficiência do fluxo de elétrons no fotossistema das plantas. Estes resultados relacionam-se diretamente com os mecanismos reflexivos e fotoprotetores (Glenn et al. 2002; Kok e Bal, 2018) observados em *Coffea canephora* (Silva et al. 2019c), *Solanum lycopersicum* (Boari et al. 2016; Silva et al. 2019b), *Vitis labrusca* (Silva et al. 2019a), *Ipomeia batatas* (Oliveira et al. 2022), *Malus domestica* (Glenn, 2016) e *Vitis vinifera* (Bernardo et al. 2017; Dinis et al. 2016b); *Solanum lycopersicum* (Zushi et al. 2012).

A aplicação de filmes de partículas também proporcionou um efeito fotoprotetor nas clorofilas, em ambas as cultivares, tanto na fase vegetativa quanto na reprodutiva, preservando-as, e até mesmo incrementando, contribuindo assim para que as plantas de soja aumentassem a eficiência de absorção de luz (Sano et al. 2018; Stagnari et al. 2018, Gharaghani et al. 2018), podendo ser um indicador de respostas adaptativas à redução da disponibilidade de luz (Ilic et al. 2015). Assim, com o aumento das concentrações de filme de cálcio ocorreu o aumento na síntese de Chl para capturar mais luz sob uma intensidade mais baixa. Como o aumento da quantidade de Chl *b* que também pode mitigar a absorção de luz azul-violeta em condições de pouca luz, como um possível mecanismo adaptativo para melhorar o crescimento da planta (Zhang et al. 2016), que é refletido também no aumento da taxa fotossintética, proporcionando maior produção de energia que será fundamental para produção de fotoassimilados. Portanto, aumento da *A* e redução da temperatura foliar indicam que o filme de partículas está relacionado não somente com efeitos antitranspirantes (Boari et al. 2015), mas também a um mecanismo fotoinibitório e, conseqüentemente, maior taxa da fotossíntese líquida (*A*) (Figuras 3-6). Na fase reprodutiva a planta sem proteção não manteve a eficiência, apresentando menor taxa fotossintética (Silva et al. 2019a).

A aplicação do filme à base de CaO a 9% resultou no sombreamento artificial, que promoveu a redução da energia luminosa que chega nos complexos coletores de luz dos cloroplastos (Stirbet et al. 2018), reduzindo a absorção de energia e a emissão de fluorescência para o fluxo de energia (Dinis et al. 2016b, 2018b). Assim, os filmes de partículas evitam o estresse oxidativo das plantas de soja em alta intensidade luminosa, reduzindo as emissões de fluorescência (Dinis et al. 2018b). Altas luminosidade e temperaturas podem causar estresses em espécies vegetais atingindo diretamente o aparato fisiológico, causando fotoinibição (Correia et al. 2005; Wang et al. 2018), aumentando a produção de espécies reativas de oxigênio

(ROS) (Dinis et al. 2016a), reduzindo também taxas fotossintéticas, pela menor difusão de CO₂ (Iqbal et al. 2019).

Este estudo revelou que o sombreamento artificial, resultante do uso do filme de partícula à base de CaO, proporcionou menor dano causado pelo estresse luminoso e de temperatura, cujos efeitos foram visíveis na curva de fluorescência variável (Figura 7) apresentada nas fases vegetativa e reprodutiva. A inclinação das curvas foi menor para os tratamentos que foi usado o filme, indicando diferentes mecanismos de respostas fotossintéticas ao gerenciamento do estresse (Stirbet et al. 2018). Apesar de serem pouco visíveis as diferenças entre as curvas de fluorescência entre os tratamentos sob diferentes concentrações, houve um aumento na fluorescência nas bandas K e J observado no controle. Ainda analisando a curva da fluorescência verificou-se que a banda J teve o mesmo comportamento observado na banda P, ocorrendo esse processo em virtude do acúmulo de QA (acceptor primário de plastoquinona) em PSII RCs devido ao bloqueio do transporte de elétrons de QA para QB (acceptor secundário de plastoquinona) (Chen et al. 2016; Kalaji et al. 2016; Oliveira et al. 2022). O parâmetro como $\dot{y}K$ tem sido indicado para expressar a sensibilidade ou tolerância da planta ao estresse térmico (Chen et al. 2016; Kalaji et al. 2016), onde o aumento de $\dot{y}K$ pode ocorrer devido a uma inativação do complexo de elevação de oxigênio (OEC), reduzindo em sua eficiência, resultando em um desequilíbrio entre o fluxo de elétrons do OEC para os RCs e para o lado acceptor do PSII ou uma mudança no estado redox do pool PQ (Strasser, 1997; Guha et al. 2013; Kalaji et al. 2017), que causa danos oxidativos às membranas dos tilacoides. Os altos níveis de ROS, causados pela inativação OEC, são bastante prejudiciais ao crescimento e ao rendimento das culturas (Tahjib-UI-Arif et al. 2019). O complexo evolutivo de oxigênio (OEC) é um dos compostos fotossintéticos mais sensíveis ao estresse térmico (Kalaji et al. 2014; Oukarroum et al. 2009).

Nesse sentido, além do dano no complexo de evolução de oxigênio, o excesso de radiação solar poderá causar um bloqueio do processo fotossintético causando redução da plastoquinona QA, inibindo o transporte de elétrons até a plastoquinona QB (Strasser, 1997; Kalaji et al. 2016; Stirbet et al. 2018; Chen et al. 2016). Dessa forma, esse dano pode ser intensificado nas plantas de soja quando submetidas a estresse luminoso, demonstrando que a cinética de redução/oxidação dos receptores quinonas do PSII (QA e QB) são sensíveis à temperatura e intensidade luminosa (Essemine et al. 2017), fato esse observado nas plantas de soja sem aplicação do filme (Figuras 8 e 9).

Os resultados também indicaram que o estresse causado pela alta luminosidade, principalmente nas parcelas sem aplicação de filme, afetou o processo de saída de PQ e alterou o fluxo de elétrons de PQH₂ para o acceptor final (Yusuf et al. 2010). Estando relacionado o efeito de refletância, reduzindo a radiância fotossintética ativa (PAR), a radiância ultravioleta (UV) e a radiação infravermelha (Glenn et al. 2002; Glenn 2012) nos centros de reação dos cloroplastos (Boari et al. 2015). Em seu estudo, Oliveira et al. (2022) verificaram que a aplicação de filmes de partículas mitigou o estresse luminoso em plantas de batata-doce, reduzindo os danos ao aparato fotossintético (Oliveira et al. 2022), esses efeitos foram verificados também na videira (Silva et al. 2019a) e no tomateiro (Silva et al. 2019b).

Reduções na emissão de fluorescência estão relacionadas, possivelmente, à adaptação do metabolismo fotossintético das plantas imposta ao sombreamento (Silva et al. 2019a), resultando na diminuição considerável de PAR (Stirbet et al. 2018), na absorção de energia e na necessidade de emissão de fluorescência para o fluxo de excesso energético como prevenção ao stress fotooxidativo (Dinis et al. 2018a, 2016b). Estas respostas estão coerentes com os menores valores observados no modelo fenomenológico de fluxos de energia da seção transversal do complexo antena do PSII: de ABS/CS, TR/CS, RE/CS e DI/CS para 6% de cálcio na cultivar FTR3191 IPRO e 9% para a 57i59RSF IPRO (Figuras 10 e 11). Nesse sentido, para a soja sugere-se que o sombreamento artificial possibilite a redução de energia absorvida resultando em uma maior gestão e transporte de elétrons excitados para uma maior eficiência da fosforilação do NADPH, resultando em maior PIabs (Figuras 10 e 11). Além disso, estes

resultados são indicadores de melhor gestão das atividades fotossintéticas sob condições de estresse luminoso (Stirbet et al. 2018; Silva et al. 2019a; Silva et al. 2019b; Oliveira et al. 2022, 2022; Dinis et al. 2016b). Quando a taxa de absorção de energia luminosa pelos pigmentos fotossintéticos excede a taxa de seu consumo, a energia luminosa absorvida acelera o processo de fotoinibição (Kalaji et al. 2018), necessitando de maior atividade dos mecanismos não fotoquímicos da xantofila na antena do PSII para dissipar a energia não útil (Goussi et al. 2018).

A dissipação é um mecanismo de defesa que as plantas usam quando estão em condições de estresses por excesso de luz (Kalaji et al. 2018), resultante do fotodano ao OEC. Esse dano é potencializado à medida que a luz é absorvida pelos pigmentos fotossintéticos e não ocorre a doação dos elétrons do OEC aos centros de reação do PSII (Takahashi e Badger, 2011). Nesse sentido, as informações observadas estão coerentes com os resultados apresentados anteriormente (Figuras 7 e 8), onde demonstram maiores valores da variável K no controle, em que essa está diretamente relacionada com o dano no OEC.

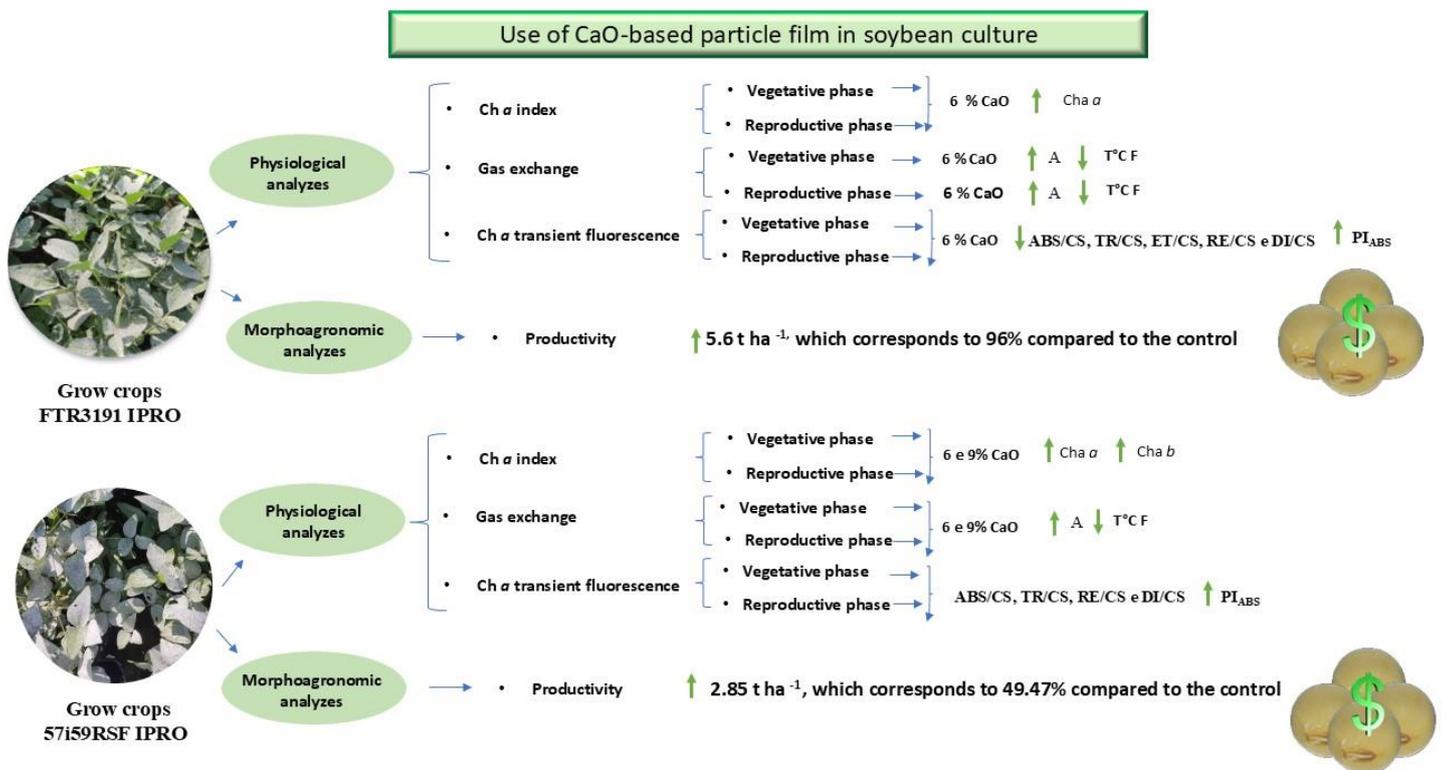


Fig.17. Mapa conceitual do efeito do filme de partícula nas variáveis estudadas.

4.5. Conclusões

A aplicação de filme à base de CaO na cultivar 57i59RSF (não recomendada) na concentração de 9% proporciona uma produtividade equivalente à encontrada na cultivar FTR3191 (recomendada) sem aplicação de CaO.

A aplicação de filme de partículas a 6% de CaO na cultivar FTR3191 (recomendada) leva a uma produção de 5,57 t.ha⁻¹, 96% a mais que a produtividade das plantas sem aplicação de filme.

O filme de partículas promove fotoproteção às plantas, fazendo com que diminua a temperatura foliar, preserve as clorofilas e aumente a taxa fotossintética.

O filme de partículas contribui para a melhoria dos índices de performance da transiente da clorofila *a* e diminuição da dissipação energética.

Os parâmetros fisiológicos apresentam diferenças substanciais entre fase vegetativa e reprodutiva da soja e com as maiores concentrações do filme essas diferenças diminuem.

O filme de partícula à base de cálcio proporciona que a máxima produtividade esperada pela cultivar seja aumentada pelo maior controle da temperatura foliar e excesso de radiação solar da região.

Novos estudos podem avaliar outros produtos para a preparação do filme protetor e na avaliação de sua eficiência.

Outras espécies cultivadas podem ser observadas na presença do filme protetor, abrindo assim uma nova chance de investigação.

4.6. Referências Bibliográficas

- ALPINO, T. M. A.; MAZOTO, M. L.; BARROS, D. C.; FREITAS, C.M. Os impactos das mudanças climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional: uma revisão da literatura. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 27, n. 1, p.273–286, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-81232022271.05972020>
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.D.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol**, v.22, n.6, p.711–728, 2013. Disponível em: doi:10.1127/0941-2948/2013/0507
- ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 34, p.53–66, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.34100.005>
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of Soybean Resilience to Drought through Deep Root System in Brazil. **Agronomy Journal**, v.109, n.4, p.1612–1622, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0023>
- BERNARDO, S.; DINIS, L. T.; LUZIO, A.; PINTO, G.; MEIJÓN, M.; VALLEDOR, L.; CONDE, A.; GERÓS, H.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Kaolin particle film application lowers oxidative damage and DNA methylation on grapevine (*Vitis vinifera* L.). **Environmental and Experimental Botany**, v. 139, p. 39–47, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.002>
- BOARI, F.; DONADIO, A.; PACE, B.; SCHIATTONE, M. I.; CANTORE, V. Kaolin improves salinity tolerance, water use efficiency and quality of tomato. **Agricultural Water Management**, v. 167, p. 29–37, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.021>
- BOARI, F.; DONADIO, A.; SCHIATTONE, M. I.; CANTORE, V. Particle film technology: A supplemental tool to save water. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 154–162, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.014>
- BRITO, C.; DINIS, L. T.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; CORREIA, C. Kaolin, an emerging tool to alleviate the effects of abiotic stresses on crop performance. **Scientia Horticulturae**, v. 250, p. 310–316, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.070>
- CHEN, S.; YANG, J.; ZHANG, M.; STRASSER, R. J.; QIANG, S. Classification and characteristics of heat tolerance in *Ageratina adenophora* populations using fast chlorophyll a fluorescence rise O-J-I-P. **Environmental and Experimental Botany**, v. 122, p. 126–140, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.09.011>
- CHEN, Z.; XU, J.; WANG, F.; WANG, L.; XU, Z. Morpho-physiological and proteomic responses to water stress in two contrasting tobacco varieties. **Scientific Reports**, v.9, n.1, p.1-15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54995-1>

- CONDE, A.; NEVES, A.; BREIA, R.; PIMENTEL, D.; DINIS, L.T.; BERNARDO, S.; CORREIA, C.M.; CUNHA, A.; GERÓS, H.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Kaolin particle film application stimulates photoassimilate synthesis and modifies the primary metabolome of grape leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 223, p.47–56, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.02.004>.
- CORREIA, C.M.; PEREIRA, J.M.M.; COUTINHO, J.F.; BJÖRN, L.O.; TORRES-PEREIRA, J.M.G. Ultraviolet-B radiation and nitrogen affect the photosynthesis of maize: a Mediterranean field study. **European Journal of Agronomy**, v. 22, p.337–347, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.05.002>
- COTRIM, M. F.; GAVA, R.; CAMPOS, C. N. S.; DE DAVID, C. H. O.; REIS, I. D. A.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E. Physiological performance of soybean genotypes grown under irrigated and rainfed conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n.1, p.34–43, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jac.12448>
- DINIS, L. T.; BERNARDO, S.; CONDE, A.; PIMENTEL, D.; FERREIRA, H.; FÉLIX, L.; GERÓS, H.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Kaolin exogenous application boosts antioxidant capacity and phenolic content in berries and leaves of grapevine under summer stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 191, p. 45–53, 2016b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2015.12.005>
- DINIS, L. T.; FERREIRA, H.; PINTO, G.; BERNARDO, S.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Kaolin-based, foliar reflective film protects photosystem II structure and function in grapevine leaves exposed to heat and high solar radiation. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 47–55, 2016a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0156->
- DINIS, L. T.; MALHEIRO, A. C.; LUZIO, A.; FRAGA, H.; FERREIRA, H.; GONÇALVES, I.; PINTO, G.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Improvement of grapevine physiology and yield under summer stress by kaolin-foliar application: water relations, photosynthesis and oxidative damage. **Photosynthetica**, v. 56, n. 2, p. 641–651, 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0714-3>
- DINIS, L.T.; BERNARDO, S.; LUZIO, A.; PINTO, G.; MEIJÓN, M.; PINTÓ-MARIJUAN, M.; COTADO, A.; CORREIA, C.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Kaolin modulates ABA and IAA dynamics and physiology of grapevine under Mediterranean summer stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 220, p.181–192, 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.11.007>
- ESSEMIN, J.; XIAO, Y.; QU, M.; MI, H.; ZHU, X.G. Cyclic electron flow may provide some protection against PSII photoinhibition in rice (*Oryza sativa* L.) leaves under heat stress. **Journal of Plant Physiology**, v.211, p.138–146, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.01.007>
- FAHAD, S.; BAWA, A. A.; NAZIR, U.; ANJUM, S. A.; FAROOQ, A.; ZOHAI, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M. Z.; ALHARBY, H.; WU, C.; WANG, D.; HUANG, J. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. **Frontiers in Plant Science**, v.8, n.1, p.1-16, 2017. Disponível em: <https://doi: 10.3389/fpls.2017.01147>
- FERREIRA, D. F. 2011. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA). 35:1039-1042.
- GHRAGHANI, A.; JAVARZARI, A. M.; VAHDATI, K. Kaolin particle film alleviates adverse effects of light and heat stresses and improves nut and kernel quality in Persian walnut. **Scientia Horticulturae**, v. 239, n. April, p. 35–40, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.024>
- GLENN, D. M. Effect of highly processed calcined kaolin residues on apple water use efficiency. **Scientia Horticulturae**, v. 205, p. 127–132, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.022>
- GLENN, D. M. The mechanisms of plant stress mitigation by kaolin-based particle films and

- applications in horticultural and agricultural crops. **HortScience**, v. 47, n. 6, p. 710–711, 2012. Disponível em: <https://doi:10.21273/hortsci.47.6.710>
- GLENN, D.M.; PRADO, E.; EREZ, A.; MCFERSON, J.; PUTERKA, G.J. A reflective, processed Kaolin particle film affects fruit temperature, radiation reflection, and solar injury in apple. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.127, n.2, p.188–193, 2002. Disponível em: <https://doi:10.21273/jashs.127.2.188>
- GOUSSI, R.; MANAA, A.; DERBALI, W.; CANTAMESSA, S.; ABDELLEY, C.; BARBATO, R. Comparative analysis of salt stress, duration and intensity, on the chloroplast ultrastructure and photosynthetic apparatus in *Thellungiella salsuginea*. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.183, p.275–287, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.04.047>.
- GUHA, A.; SENGUPTA, D.; REDDY, A.R. Polyphasic chlorophyll *a* fluorescence kinetics and leaf protein analyses to track dynamics of photosynthetic performance in mulberry during progressive drought. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v.119, p.71–83, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2012.12.006>
- IQBAL, N.; HUSSAIN, S.; RAZA, M.A.; YANG, C.Q.; SAFDAR, M.E.; BRESTIC, M.; AZIZ, A.; HAYYAT, M.S.; ASGHAR, M.A.; WANG, X.C.; ZHANG, J.; YANG, W.; LIU, J. Drought Tolerance of Soybean (*Glycine max* L. Merr.) by Improved Photosynthetic Characteristics and an Efficient Antioxidant Enzyme Activities Under a Split-Root System. **Frontiers in Physiology**, v. 10, p.786, 2019. Disponível em: <https://doi:10.3389/fphys.2019.00786>
- JIANG, A.C.D.; GAOB, H.Y.; ZOUB, Q.; JIANGA, G.M.; LIA, L. H. Leaf Orientation, Photorespiration and Xanthophyll Cycle Protect Young Soybean Leaves Against High Irradiance in Field. **Environmental and Experimental Botany**, v. 55, p. 1-10, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.10.003>
- JUMRANI, K.; BHATIA, V. S. Identification of drought tolerant genotypes using physiological traits in soybean. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v.25, p.697–711, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12298-019-00665-5>
- KALAJI, H. M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I. A.; CETNER, M. D.; ŁUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R. J. Chlorophyll *a* Fluorescence as a Tool to Monitor Physiological Status of Plants under Abiotic Stress Conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.38, n. 4, p. 102, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y>.
- KALAJI, H. M.; RAČKOVÁ, L.; PAGANOVÁ, V.; SWOCZYNA, T.; RUSINOWSKI, S.; SITKO, K. Can Chlorophyll-*a* Fluorescence Parameters Be Used as Bio-Indicators to Distinguish between Drought and Salinity Stress in *Tilia Cordata* Mill? **Environmental and Experimental Botany**, v.152, p.149–157, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.11.001>.
- KALAJI, H. M.; SCHANSKER, G.; BRESTIC, M.; BUSSOTTI, F.; CALATAYUD, A.; FERRONI, L.; GOLTSEV, V.; GUIDI, L.; JAJOO, A.; LI, P.; LOSCIALE, P.; MISHRA, V. K.; MISRA, A. N.; NEBAUER, S. G.; PANCALDI, S.; PENELLA, C.; POLLASTRINI, M.; SURESH, K.; TAMBUSSI, E.; YANNICCARI, M.; ZIVCAK, M.; CETNER, M. D.; SAMBORSKA, I. A.; STIRBET, A.; OLSOVSKA, K.; KUNDERLIKOVÁ, K.; SHELONZEK, H.; RUSINOWSKI, S.; BAĞA, W. Frequently Asked Questions about Chlorophyll Fluorescence, the Sequel. **Photosynthesis Research**, v.132, n.1, p. 13–66, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11120-016-0318-y>.
- KALAJI, H.M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I.A.; CETNER, M.D.; ŁUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R.J. The Use of Chlorophyll Fluorescence Kinetics Analysis to Study the Performance of Photosynthetic Machinery in Plants. **Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance**, v.2, p.347–384, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800875-1.00015-6>

- KOESTER, R. P.; NOHL, B. M.; DIERS, B. W.; AINSWORTH, E. A. Has photosynthetic capacity increased with 80 years of soybean breeding? An examination of historical soybean cultivars. **Plant, Cell & Environment**, v.39, n.5, p.1058–1067, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pce.12675>
- KOK, D.; BAL, E. Leaf Removal Treatments Combined with Kaolin Particle Film Technique from Different Directions of Grapevine's Canopy Affect the Composition of Phytochemicals of cv. Muscat Hamburg (*V. Vinifera* L.). **Erwerbs-Obstbau**, v. 60, n. 1, p. 39–45, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10341-017-0337-7>
- KRENCHINSKI, F.H.; ALBRECHT, A.J.P.; SALOMÃO CESCO, V.J.; RODRIGUES, D.M.; PEREIRA, V.G.C.; ALBRECHT, L.P.; CARBONARI, C.A.; VICTÓRIA FILHO, R. Post-emergent applications of isolated and combined herbicides on corn culture with cp4-epsps and pat genes. **Crop Protection**, v. 106, p.156–162, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.11.016>
- KUNERT, K.J.; VORSTER, B.J.; FENTA, B.A.; KIBIDO, T.; DIONISIO, G.; FOYER, C.H. Drought stress responses in soybean roots and nodules. **Frontiers in Plant Science**, v.7, p.1015, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01015> PMID: 27462339
- LI, Y.; LIU, C.; ZHANG, J.; YANG, H.; XU, L.; WANG, Q.; SACK, L.; WUA, X.; HOUA, J.; HE, N. Variation in leaf chlorophyll concentration from tropical to cold-temperate forests: association with gross primary productivity. **Ecological Indicators**, v. 85, p. 383–389, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.025>.
- LIU, X.; RAHMAN, T.; SONG, C.; SU, B.; YANG, F.; YONG, T.; WU, Y.; ZHANG, C.; YANG, W. Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems. **Field Crops Research**, v.200, p.38–46, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.003>
- NEVENKA, D.; ĆOSIĆ, M.; STRIČEVIĆ, R.; SAVIĆ, S.; DOMAZET, M. Effect of irrigation regime and application of kaolin on yield, quality and water use efficiency of tomato. **Scientia Horticulturae**, v. 201, p. 271–278, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.02.017>.
- NIEVOLA, C. C.; CARVALHO, C. P.; CARVALHO, V.; RODRIGUES, E. Rapid responses of plants to temperature changes. **Temperature**, v. 4, n. 4, p. 371–405, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23328940.2017.1377812>
- OLIOSI, G.; OLIVEIRA, R. J.; FALQUETO, A.R.; PIRES, F.R.; MONTE, J.A.; PARTELLI, F.L. Fluorescência transiente da clorofila a e crescimento vegetativo em cafeeiro conilon sob diferentes fontes nitrogenadas. **Coffee Science**, v.12, p.248–259, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.25186/cs.v12i2.1268>
- OLIVEIRA JÚNIOR, L. F. G.; SANTOS, P. L. de S.; LIMA, R. S. N. de; SILVEIRA, M. P. C.; FAGUNDES, J. L.; CARNELOSSI, M. A. G.; REIS, F. de O. Physiological parameters of cowpea treated with CaO-based particle film and subjected to water restriction. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00033>
- OLIVEIRA, A. P.; DINIS, L. T. R.; BARBOSA, N. T. B.; DE MATTOS, E. C.; FONTES, P. T. N.; CARNELOSSI, M. A. G.; FAGUNDES, J. L.; DA SILVA, E. C.; OLIVEIRA JUNIOR, L. F. G. Calcium particle films promote a photoprotection on sweet potato crops and increase its productivity. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40626-020-00192-9>
- OLIVEIRA, A.; DINIS, L.; SANTOS, A.; FONTES, P.; CARNELOSSI, M.; FAGUNDES, J.; JUNIOR, L. Particle Film Improves the Physiology and Productivity of Sweet Potato without Affecting Tuber's Physicochemical Parameters. **Agriculture**, v.12, n.4, p.558, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture12040558>
- OLIVEIRA, F.C.C.; PEDROTTI, A.F.A.G.S.; SOUZA, J.L.S.; HOLANDA, F.S.R.; MELLO, J. A.V. Chemical characteristics of Ultisols and the corn yield at Costal Plains of Sergipe, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v.12, n.3, p.354–360, 2017. Disponível em:

[https://DOI: 10.5039/agraria.v12i3a5464](https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5464)

OUKARROUM, A.; SCHANSKER, G.; STRASSER, R. J. Drought Stress Effects on Photosystem I Content and Photosystem II Thermotolerance Analyzed Using Chl *a* Fluorescence Kinetics in Barley Varieties Differing in Their Drought Tolerance. **Physiologia Plantarum**, v. 137, n. 2, p. 188–199, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2009.01273.x>.

SANO, T.; HORIE, H.; MATSUNAGA, A.; HIRONO, Y. Effect of shading intensity on morphological and color traits and on chemical components of new tea (*Camellia sinensis* L.) shoots under direct covering cultivation. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, p. 5666–5676, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9112>.

SCHLICHTING, A.F.; BOMFIM-SILVA, E.M.; SILVA, M.C.; PIETRO-SOUZA, W.; SILVA, T.J.A.; FARIAS, L.N. Efficiency of portable chlorophyll meters in assessing the nutritional status of wheat plants. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.1148-1151, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1148-1151>

SFREDO, G.J.; OLIVEIRA, M.C.N. DE. **Soja: Molibdênio e Cobalto**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. 36p. (Embrapa Soja. Documentos, 322)

SHARMA, R. R.; REDDY, S. V. R.; DATTA, S. C. Particle films and their applications in horticultural crops. **Applied Clay Science**, v. 116–117, p. 54–68, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.08.009>

SIEBERS, M. H.; YENDREK, C. R.; DRAG, D.; LOCKE, A. M.; RIOS ACOSTA, L.; LEAKEY, A. D. B.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J.; ORT, D. R. Heat Waves Imposed During Early Pod Development in Soybean (*Glycine Max*) Cause Significant Yield Loss Despite a Rapid Recovery from Oxidative Stress. **Global Change Biology**, v. 21, n. 8, p. 3114–3125, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.12935>

SILVA, P. S. O. da; SENA, E. D. O. A.; GONZAGA, M. I. S.; DE OLIVEIRA, L. F. G.; MACIEL, L. B. dos S.; DOS SANTOS, M. P. F.; DE MATTOS, E. C.; DIAS, K. L. L.; CARNEIRO, R. B.; CARNELOSSI, M. A. G. Calcium carbonate particle films and water regimes affect the acclimatization, ecophysiology and reproduction of tomato.

Environmental and Experimental Botany, v. 165, n. May, p. 19–29, 2019b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.05.017>

SILVA, P. S. O.; OLIVEIRA, L. F. G.; GONZAGA, M. I. S.; SENA, E. de O. A.; MACIEL, L. B. dos S.; FIAES, M. P.; MATTOS, E. C. de; CARNELOSSI, M. A. G. Effects of calcium particle films and natural shading on ecophysiological parameters of conilon coffee. **Scientia Horticulturae**, v. 245, n. October 2018, p. 171–177, 2019c. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.010>

SILVA, P. S. O.; OLIVEIRA, L.F.D.G.; MATTOS, E.C.; MACIEL, L.B.D.S.; SANTOS, M.P.F.; SENA, E.D.O.A.; FAGUNDES, J.L. Calcium particle films promote artificial shading and photoprotection in leaves of American grapevines (*Vitis labrusca* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 252, p.77–84, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.041>

STAGNARI, F.; DI MATTIA, C.; GALIENI, A.; SANTARELLI, V.; EGIDIO, S.D.; PAGNANI, G.; PISANTE, M. Light quantity and quality supplies sharply affect growth, morphological, physiological and quality traits of basil. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 277–289, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.073>.

STIRBET, A.; LAZÁR, D.; KROMDIJK, J.; GOVINDJEE. Chlorophyll a fluorescence induction: Can just a one-second measurement be used to quantify abiotic stress responses? **Photosynthetica**, v. 56, n. 1, p. 86–104, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11099-018-0770-3>

STRASSER, B.J. Donor side capacity of Photosystem II probed by chlorophyll a fluorescence transients. **Photosynthesis Research**, v.52, p.147–155, 1997. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/A:1005896029778.pdf>

- TAHJIB-UI-ARIF, M.; SOHAG, A.A.M.; AFRIN, S.; BASHAR, K.K.; AFRIN, T.; MAHAMUD, A.; POLASH, M.A.S.; HOSSAIN, M.; SOHEL, M.; TAHER, A. Differential Response of Sugar Beet to Long-Term Mild to Severe Salinity in a Soil–Pot Culture. **Agriculture**, v. 9, n. 10, p. 223, 13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture9100223>
- TAIZ, L.; ZEIGER. **Fisiologia Vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.
- TAKAHASHI, S.; BADGER, M. R. Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage. **Trends in Plant Science**, v. 16, n. 1, p. 53–60, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.10.001>
- TEODORO, L. P. R.; BHERING, L. L.; GOMES, B. E. L.; GOMES, B.E.L.; CAMPOS, C. N. S.; BAIO, F. H. R.; GAVA, R. TEODORO, P. E. Understanding the combining ability for physiological traits in soybean. **PLoS One**, v.14, n.12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226523>
- WANG, S.; ZHUANG, K.; ZHANG, S.; YANG, M.; KONG, F.; MENG, Q. Overexpression of a tomato carotenoid ϵ -hydroxylase gene (SILUT1) improved the drought tolerance of transgenic tobacco. **Journal of Plant Physiology**, v. 222, p. 103–112, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.01.009>
- WANG, Y.; FREI, M. Stressed food – The impact of abiotic environmental stresses on crop quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 141, n. 3–4, p. 271–286, maio 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.017>
- YUSUF, MOHD. A.; KUMAR, D.; RAJWANSHI, R.; STRASSER, R. J.; TSIMILLI-MICHAEL, M.; GOVINDJEE; SARIN, N. B. Overexpression of γ -tocopherol methyl transferase gene in transgenic Brassica juncea plants alleviates abiotic stress: Physiological and chlorophyll a fluorescence measurements. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1797, n. 8, p. 1428–1438, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2010.02.002>
- ZHANG, H.; ZHONG, H.; WANG, J.; SUI, X.; XU, N. Adaptive changes in chlorophyll content and photosynthetic features to low light in *Physocarpus amurensis* Maxim and *Physocarpus opulifolius* “Diabolo.” **Peer J**, v. 4, p. 2125, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj.2125>
- ZHENG, H. F.; ZHANG, X.; MA, W.; SONG, J.; RAHMAN, S. U.; WANG, Z. Morphological and physiological responses to cyclic drought in two contrasting genotypes of *Catalpa bungei*. **Environmental and Experimental Botany**, v.138, p.77–87, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enveexpbot.2017.02.016>
- ZUSHI, K.; KAJIWARA, S.; MATSUZOE, N. Chlorophyll a fluorescence OJIP transient as a tool to characterize and evaluate response to heat and chilling stress in tomato leaf and fruit. **Scientia Horticulturae**, v. 148, p. 39–46, 2012. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.scienta>.

5. ARTIGO 2

QUALIDADE EM SEMENTES USANDO TRATAMENTO MEDIADO POR FILME DE PARTICULA À BASE DE CÁLCIO

Periódico que será submetido e publicado: Theoretical and Experimental Plant Physiology

RESUMO

Parâmetros de qualidade de sementes são relacionados à qualidade física, fisiológica, genética e sanitária. O grande desafio é obter qualidade em sementes que esteja relacionada não somente à genética da planta, mas também aos sistemas de cultivo empregados, em condições estressantes. O presente trabalho tem como hipótese que o uso de filme de partículas de cálcio (CaO) em plantas de soja visando o efeito fotoprotetor afeta positivamente a qualidade da semente. Como material biológico empregou-se sementes de duas cultivares, FTR3191 IPRO e 57I59RSF IPRO, safra 2021/2022. As cultivares foram tratadas com a aplicação foliar do filme à base de óxido de cálcio (CaO), iniciada quando as plantas estavam no estágio V5, com três doses de filme de óxido de cálcio com concentrações de 0%, 3%, 6% e 9%. Foram avaliadas quatro repetições de 50 sementes por cultivar. As variáveis analisadas foram produtividade em toneladas por hectare, massa de mil sementes, teor de água, teste de germinação (G), índice de velocidade de germinação (IVG), massa seca e fresca de plântulas e análise de imagens de sementes e plântulas com auxílio do GroundEye. A concentração a 9% de CaO proporcionou maior germinação, IVG e primeira contagem para a cultivar 57I59RSF IPRO. O filme de partículas não influenciou as características de textura das sementes independente das cultivares. Os resultados indicam que o filme de partícula proporciona o aumento de produtividade sem causar danos na qualidade da semente.

Palavras-chave: Groundeye®, vigor, fotoproteção

SEED QUALITY USING A CALCIUM-BASED PARTICLE FILM TREATMENT ON SOYBEAN

Abstract

Seed quality parameters are related to physical, physiological, genetic, and health qualities. A major challenge is to achieve quality seeds not only in relationship to plant genetics but also to the crop systems used under stress conditions. The hypothesis of the present study is that the use of a calcium oxide (CaO) particle film on soybean plants for a photoprotective effect impacts seed quality. Seeds from two soy cultivars, FTR3191 IPRO and 57I59RSF IPRO, from the 2021/2022 season were used as biological material. A calcium oxide (CaO) film was applied on the leaves of the cultivars when the plants were at the V5 stage, using three doses of the film – 3%, 6%, and 9% – in addition to a control (0% concentration of calcium oxide). Four replicates of 50 seeds per cultivar were evaluated. The variables analyzed were yield in tons per hectare, thousand seed weight, water content, the germination test (G), the germination speed index (IVG), seedling dry and fresh matter, and image analysis of seeds and seedlings assisted by GroundEye®. The 9% CaO concentration provided higher germination, IVG, and first germination count for the cultivar 57I59RSF IPRO. The particle film did not affect the seed texture characteristics, regardless of the cultivars. Preliminary studies indicate that the particle film increases yield without damaging seed quality.

Keywords: Groundeye®, vigor, particle film, photoprotection

5.1. Introdução

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR6), a temperatura média global, durante as duas primeiras décadas do século 21 (2001-2020), atingiu cerca de 0,99 °C (0,84-1,10 °C) acima dos níveis pré-industriais (1850-1900) (IPCC 2021), impactando diretamente diversos setores, incluindo a agricultura. No Brasil já foi comprovado que o aumento de um grau na temperatura ambiente, ao longo de 10 anos de estudo, causa alterações na época de floração e queda na quantidade de flores produzidas, o que, conseqüentemente, faz diminuir a produtividade de frutos e sementes (Vilela et al. 2018).

A produção de alimentos tornou-se cada vez mais crucial com o aumento da população global, necessitando da utilização de novas tecnologias para que possa suprir a demanda existente. A distribuição mundial e a produtividade das culturas são influenciadas por diversos elementos climáticos, afetando o rendimento das culturas. Estudos destacaram o impacto das condições climáticas na produtividade das culturas (Barreto et al. 2022; Zhu et al. 2020). Contudo, são escassos os trabalhos que abordam a qualidade das sementes diante das alterações climáticas. Nesse contexto, a soja surge como uma das principais culturas que demonstrou grande evolução adaptativa, induzida pela seleção em programas de melhoramento genético, adaptando-se às condições do Cerrado e às fronteiras agrícolas do Nordeste.

A soja é de extrema importância para a economia mundial, sendo fonte de óleo vegetal e proteína (Iqbal et al. 2019). Os maiores produtores desta cultura são Brasil, EUA, Argentina e China, representando aproximadamente 90% da produção global (Schwalbert et al. 2020). No Brasil, a safra de 2020/2021 alcançou uma produção de 135,914 mil toneladas, em uma área de 38.530 hectares, correspondendo a cerca de 37,3% da produção mundial (Conab 2019). Este sucesso produtivo está intrinsecamente relacionado à utilização de sementes de alta qualidade, sendo este um dos principais fatores para o sucesso da produção agrícola (Ribeiro 2021). O uso de sementes de qualidade assegura uma população de plantas adequada, com maior velocidade de emergência e desenvolvimento, potencializando, assim, o aumento na produtividade (Zuchi 2015).

Vários fatores, a exemplo das condições edafoclimáticas, podem influenciar o potencial fisiológico das sementes e o tamanho da semente, que pode variar tanto entre diferentes cultivares, devido ao genótipo, quanto entre lotes da mesma cultivar, em resposta a uma variedade de fatores como clima, sanidade das sementes, irrigação e fertilidade do solo (Vinhali-Freitas et al. 2011; Liu et al. 2012; Ambika et al. 2014; Pinto et al. 2018). No entanto, a exposição das plantas-mãe aos estresses abióticos pode influenciar nas características das sementes reduzindo seu vigor. Nesse sentido, o uso de filme de partículas tem mostrado eficácia fotoprotetora em vegetais, assegurando a homeostase do aparato fotossintético, garantindo a qualidade das sementes, proporcionado pelo sombreamento artificial através do aumento da reflexão do excesso de radiação (Dinis et al. 2018; Oliveira Júnior et al. 2019). Os resultados incluem a redução da temperatura da superfície foliar, melhoria na taxa de assimilação de CO₂ e na condutância estomática (Silva et al. 2019), impactando as reações fisiológicas e bioquímicas das plantas.

Uma semente de qualidade deve apresentar um potencial fisiológico ótimo, determinado pela sua germinação (viabilidade) e vigor (Pinto et al. 2018). Nesse sentido, para avaliar esse potencial fisiológico faz-se necessário o uso de metodologias tradicionais, teste de germinação e vigor, bem como o uso de tecnologias mais avançadas, a exemplo de captura de imagens, permitindo fazer uma relação entre as características físicas e fisiológicas (Medeiros et al. 2019; Torres et al. 2016; Zhang et al. 2018).

O teste de germinação é bastante utilizado para a avaliação da qualidade fisiológica de lotes de sementes, onde se torna mensurável seu potencial germinativo (Torres et al. 2016). A análise de imagens é uma ferramenta utilizada em estudos básicos e aplicados que visa elucidar

diversos aspectos do comportamento das sementes e aprimorar metodologias para avaliação de diferentes atributos de qualidade das sementes, por meio de métodos rápidos e não destrutivos (Acha & Vieira 2020; Zhang et al. 2018), além de evitar erros humanos (Medeiros et al. 2018). Um dos sistemas usados para a captura de imagens é o GroundEye, que possui ferramentas avançadas de inteligência artificial (classificador, rede de decisão, rede de decisão de análise, expressão e área de interesse por cor) que auxiliam na avaliação para que ela se torne menos subjetiva, mais precisa e com possível padronização (Andrade et al. 2024). Segundo Andrade et al. (2024), o uso de inteligência artificial para captura de imagens, por meio do sistema GroundEye, foi eficiente para avaliar a qualidade do revestimento de sementes de soja. Resultado semelhante foi verificado por Acha & Vieira (2020) ao avaliarem o potencial fisiológico da semente de soja.

Logo, este presente trabalho tem como finalidade avaliar o efeito do filme de partícula à base de cálcio na qualidade de sementes de duas cultivares de soja 57i59RSF IPRO e FTR3191 IPRO utilizando o sistema de captura de imagem GroundEye.

5.2. Material e Métodos

5.2.1 Gerenciamento da cultura

O semeio foi realizado de forma manual, obedecendo uma população de 12 plantas por metro linear. As parcelas foram constituídas de quatro linhas de 3,75 m de comprimento e 0,5 m de espaçamento, em que foram considerados dois metros das duas linhas centrais como parcela útil, desprezando-se a bordadura. A adubação foi realizada durante o plantio (120 kg ha⁻¹ P₂O₅; 80 kg ha⁻¹ K₂O), onde o potássio foi parcelado, 1/3 no plantio e 2/3 30 dias após o plantio (DAP), foi utilizado o superfosfato simples e cloreto de potássio como fonte de fósforo e potássio, respectivamente. As sementes foram tratadas com micronutrientes líquidos e, em seguida, foi feita a inoculação utilizando a proporção de 60 g de inoculante (*Bradyrhizobium japonicum*) para 300 ml de solução de micronutrientes. Foi realizada adubação foliar à base de molibdênio, cobre, zinco, boro e magnésio, micronutrientes nos estádios V3-V5 (Sfredo e Oliveira 2010), usando um volume de calda recomendado pelo fabricante

5.2.2 Material Biológico

Utilizou-se sementes das cultivares de soja, cultivar 1 (FTR3191 IPRO-recomendada para as condições de estudo) e cultivar 2 (57i59RSF IPRO- não recomendada para as condições de estudo), ambas de crescimento indeterminado, produzidas na safra 2021/2022 na fazenda experimental da Universidade de Sergipe, no município de São Cristóvão - Sergipe (10° 55' 25,1'' S; 37° 12' 1,8'' W), Brasil.

5.2.3 Tratamento Fotoprotetor

Iniciou-se a aplicação foliar de óxido de cálcio (CaO) quando as plantas estavam no estádio V5, utilizando-se quatro concentrações de óxido de cálcio: 0%, 3%, 6% e 9%. A aplicação foi feita com um pulverizador elétrico costal (Kawashima PEM-P20), com vazão de 2,9 L min⁻¹ e pressão de 450 kPa, assegurando uma cobertura uniforme das partículas nas plantas. A refletância foi de aproximadamente 90%, com partículas de tamanho ≤ 2µm (Oliveira et al. 2022). A reaplicação ocorreu semanalmente durante todo o ciclo de cultivo.

5.2.4 Produtividade

A produtividade foi estabelecida pela pesagem das sementes de todos os blocos e estimada em toneladas por hectare (t.ha⁻¹), segundo Cotrim et al. (2021).

5.2.5 Análise de Imagem das Sementes

A calibração da cor de fundo da imagem utilizou o sistema de cores CIEL *a*b no Equipamento Groundeye® Tbit. Avaliaram-se quatro repetições de 50 sementes por cultivar, analisando as variáveis relacionadas à geometria: circularidade (G_C), diâmetro máximo (G_DMax); e à textura: textura de homogeneidade (T_HH) das sementes.

5.2.6 Massa de Mil Sementes

Estimou-se a massa de 1000 sementes a partir da pesagem de quatro amostras de 100 g em balança analítica, com as médias expressas em gramas (Brasil 2009).

5.2.7 Teor de Água

O teor de água foi determinado pelo método de estufa a 105 °C ($\pm 3^\circ\text{C}$), com os resultados expressos em porcentagem (base no peso fresco) (Brasil 2009).

5.2.8 Teste de Germinação

Para a realização dos testes de germinação empregou-se quatro repetições de 50 sementes, semeadas em papel germitest em rolos, umedecidos com quantidade de água equivalente a 2,5 vezes a massa do substrato seco. As avaliações foram realizadas ao quinto e sexto dia, com os resultados expressos em porcentagem de plântulas normais (Pinto et al. 2018).

5.2.9 Índice de Velocidade de Germinação (IVG)

O índice de velocidade de germinação foi calculado pela soma dos quocientes do número de plântulas normais por cada contagem diária pelo respectivo número de dias (Maguire 1962).

5.2.10 Análise de Imagem de Plântulas

Realizada após 6 dias de semeadura em papel germitest, com as plântulas digitalizadas e analisadas pelo software GroundEye®. Avaliou-se o comprimento da parte aérea (CPA) e comprimento da raiz (CR).

5.2.11 Massa fresca e Massa seca das Plântulas

Avaliada em 20 plântulas de cada repetição, após análise de imagens. As plântulas foram pesadas em balança analítica para determinação da massa fresca (MF) e, posteriormente, secas em estufa a 80 °C por 24 horas para determinação da massa seca (MS).

5.2.12 Delineamento e Análise Estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 2 (cultivares) x 4 (doses de filme de partículas), com 4 repetições constando 50 sementes. Os dados foram avaliados quanto à normalidade (Shapiro-Wilk a 5% de significância) e quando apresentaram normalidade dos resíduos foram submetidos à análise de variância (ANAVA). As variáveis que apresentaram diferenças foram estudadas a regressão polinomial e as médias comparadas pelo teste de Tukey (5% de significância). Utilizou-se também a Análise de Componentes Principais (ACP) e a correlação de Pearson. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R 4.3.0 (R CoreTeam 2023) utilizando o pacote ExpDes.

5.3. Resultados e discussão

A cultivar 1, recomendada para a região, apresentou maior produtividade, sendo que o tratamento fotoprotetor na concentração de 6% resultou em um aumento de 96% quando comparado ao controle. A cultivar 2, não recomendada para a região, apresentou aumento na produtividade em relação ao controle, destacando-se a concentração de 9% que proporcionou um incremento de 49,47% em relação ao controle.

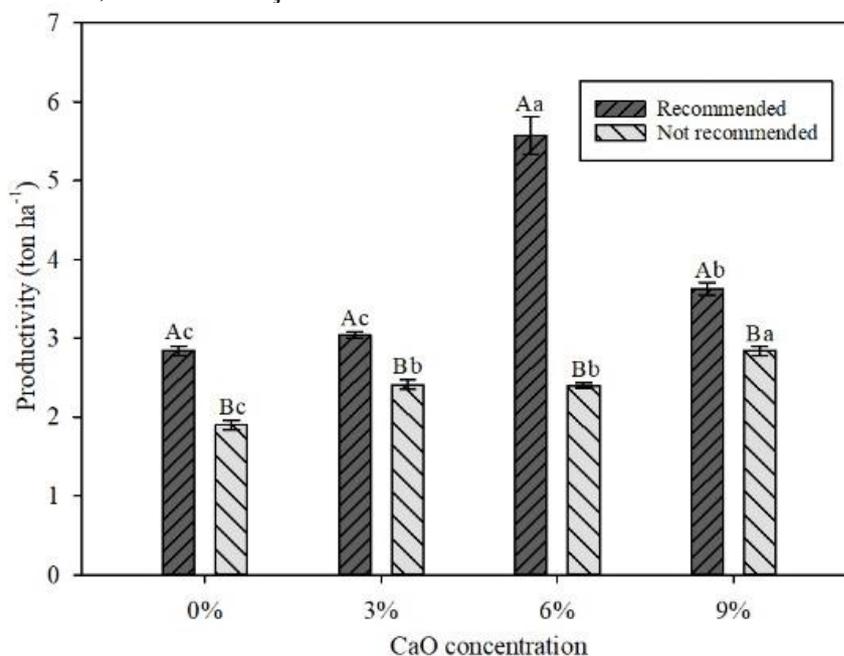


Fig. 1. Produtividade de duas cultivares de soja (FTR3191 PRO - C1 – recomendada e 57i59RSF IPRO - C2 – não recomendada) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%). As médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar, enquanto as mesmas letras maiúsculas não diferem entre as fases dentro de cada dose (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$). Os intervalos nas barras correspondem ao erro padrão.

A maior produtividade encontrada na cultivar 1 a 6% e na cultivar 2 a 9% pode ser explicada pelo efeito fotoprotetor do filme, contribuindo para maior eficiência nos processos fisiológicos, promovendo adaptações no metabolismo fotossintético, em virtude da redução do estresse fotooxidativo e maior proteção do fotossistema II (PSII) (Silva et al. 2019). Esses resultados podem ser corroborados com os obtidos na cultura do feijão-caupi (Oliveira Júnior et al. 2019) e *Ipomeia batatas* (Oliveira et al. 2022).

Na análise das sementes obtidas nas plantas submetidas ao tratamento fotoprotetor com partículas de cálcio no equipamento GroundEye®, não foram observadas alterações na textura das sementes que possam ser diretamente atribuídas às concentrações de filme de óxido de cálcio. Embora seja observado contraste entre as áreas claras e escuras, não existem diferenças marcantes, indicando que a uniformidade da superfície da semente é mantida mesmo com o tratamento de filme de CaO (Figura 2). A cultivar 2 apresentou os maiores valores para as variáveis relacionadas com a textura contraste (C1 = 37,99 e C2 = 54,19) e dissimilaridade (C1 = 3,38 e C2 = 3,94).

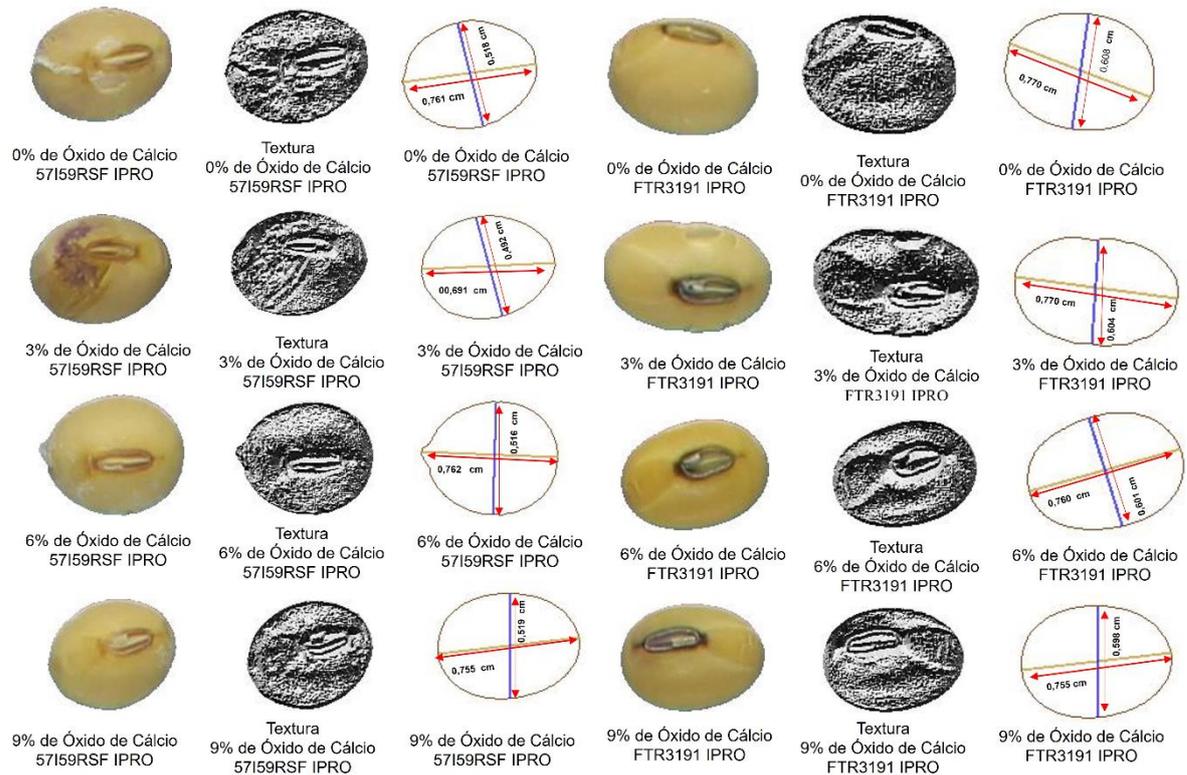


Fig. 2. Imagens de sementes de soja da cultivar 1 (A) e cultivar 2 (B), com detalhes em cores e textura, diâmetro máximo e mínimo obtido em equipamento GroundEye®.

Para as variáveis relacionadas à geometria das sementes: circularidade (Figura 3A e B) e diâmetro máximo (Figura 3C e D); e para a variável relacionada à textura, homogeneidade (Figura 3E e F), verificou-se interação significativa entre as cultivares e diferentes doses de filme de partículas aplicadas. Considerando a variável circularidade, as sementes da cultivar 1 apresentaram os maiores valores, que foram mantidos independente das doses do filme de cálcio aplicadas. Para a cultivar 2, doses maiores utilizadas no tratamento fotoprotetor resultaram em sementes com maior circularidade (Figura 3B). Essa distinção fenotípica entre as cultivares pode ser interpretada como uma variação genética inerente à resposta ao estresse ambiental modificado pelo tratamento (Bradford 1995; Kumar, Solanki 2005).

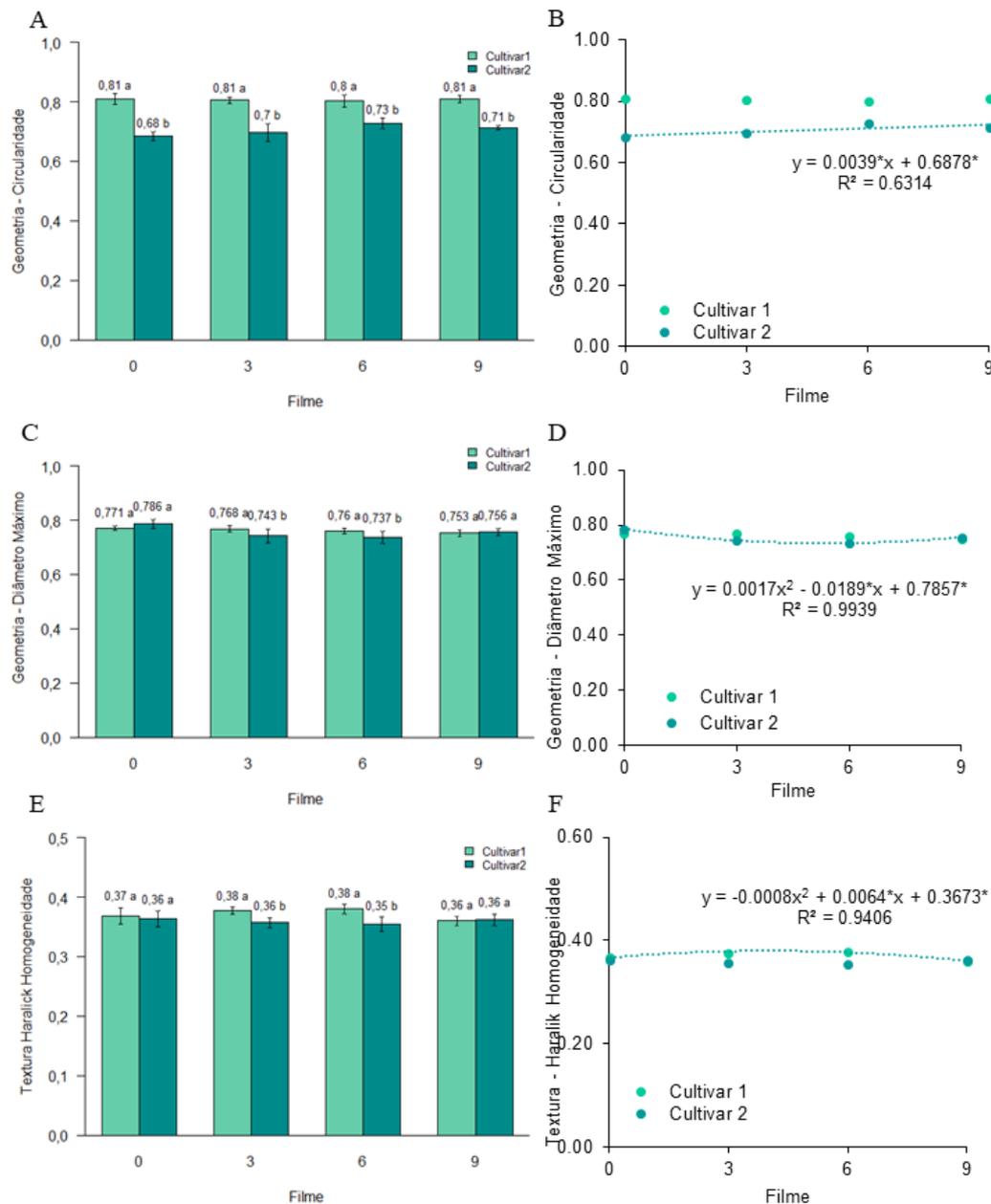


Fig. 3. Resposta das propriedades geométricas e de textura de sementes de duas cultivares de soja (FTR3191 PRO (C1) e 57i59RSF IPRO (C2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%). Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$).

É importante salientar que a análise de imagens consiste em obter informações dos objetos gravados com base em características físicas, que após as coletas dos dados, as sementes podem ser colocadas para germinar (Acha et al. 2020). Com base nessas informações é possível fazer relações entre as características físicas e fisiológicas com base nas análises (Zhang et al. 2018).

Para sementes de soja, estudos na literatura indicam a eficiência no GroundEye para estimar parâmetros físicos de sementes (Andrade 2024; Ribeiro 2021). Por exemplo, Guedes et al. (2011) avaliaram a área, perímetro, diâmetros máximo e mínimo, circularidade de sementes de soja e concluíram que a análise digital é válida para determinar a qualidade física das sementes quando comparada aos métodos de avaliação manual. Adicionalmente, o uso de

ferramentas automatizadas é de grande importância visando à redução da subjetividade (Acha et al. 2020).

Para a variável massa de mil sementes, verificou-se que a cultivar 2 apresentou sementes mais pesadas, com massa variando de 196,85 mg (filme 6%) a 227,35 mg (controle – 0%). Na cultivar 1 sementes mais pesadas foram obtidas das plantas que receberam tratamento com as doses de 6 e 9% de filme, sendo 192.00 mg e 181.70 mg, respectivamente.

As diferenças no tamanho e peso das sementes dependem das variações nas características morfológicas e fisiológicas da planta-mãe. Um dos motivos pelos quais isto ocorre, se deve à redistribuição dos fotoassimilados necessários para o desenvolvimento do grão, quanto maior o número de vagem, maior será a redistribuição.

As sementes da cultivar 2 apresentam maior teor de água (Figura 4A), contudo, tais condições não conferiram maior qualidade fisiológica, pois quando comparadas com a cultivar 1, apresentaram menores valores para a primeira contagem, germinação e índice de velocidade de germinação (Figura 4B, C e D).

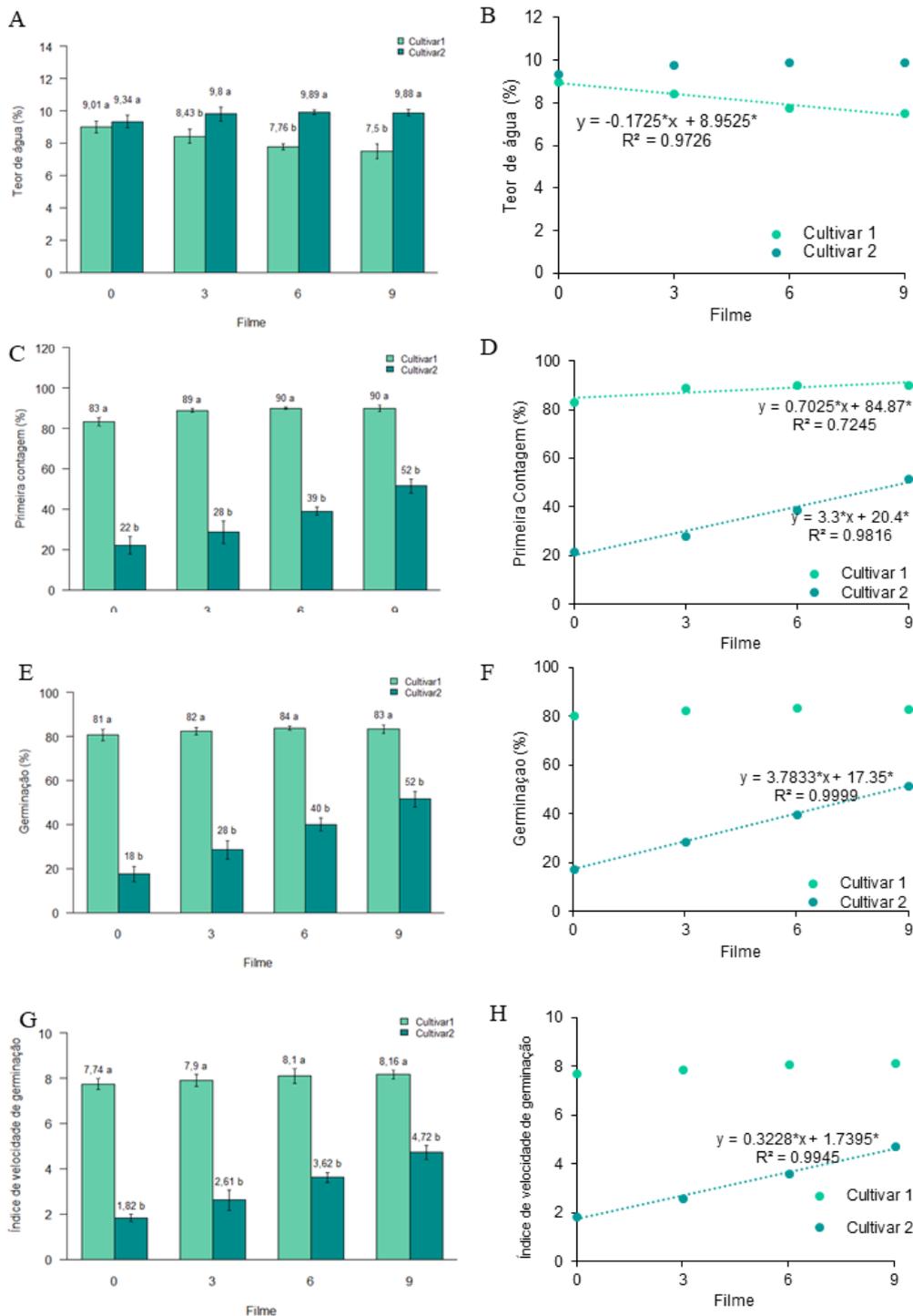


Fig. 4. Teor de água (A, B), primeira contagem (C, D), germinação (E, F) e índice de velocidade de germinação (G, H) para duas cultivares de soja (FTR3191 PRO: cultivar 1 e 57i59RSF IPRO: cultivar 2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%). Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses dentro de cada cultivar (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$).

O aumento nas concentrações de filme de óxido de cálcio promoveu uma melhora na qualidade fisiológica das sementes, especialmente para a cultivar 2 que apresentou melhor desempenho na maior dose do filme, com um acréscimo de 77,27% na germinação. Tal resultado pode estar associado ao sombreamento proporcionado pelo filme devido ao seu efeito fotoprotetor na planta-mãe e possivelmente por ser uma fonte de cálcio, que desempenha função bioquímica na planta, constitui a parede celular, é necessária para algumas enzimas na hidrólise

de ATP e fosfolipídio, atua como mensageiro secundário para a regulação metabólica e na germinação do grão de pólen e crescimento do tubo polínico (Taiz et al. 2017).

O equilíbrio nutricional das plantas é o fator primordial, interferindo diretamente no desenvolvimento da cultura (Taiz, Zaiger 2009) e na qualidade da semente. Segundo Burton et al. (2000), em plantas de soja, a redução do cálcio na solução nutritiva diminuiu a produção e o enchimento de sementes, a concentração de cálcio e aumentou o número de plântulas anormais, a incidência de hipocótilo aquoso e podridão epicótila. A presença de cálcio também resultou em efeitos positivos na qualidade das sementes de soja, melhorando a integridade das membranas, visto que esse elemento é constituinte da parede celular, tornando-as menos acessíveis às enzimas de degradação (Harter et al. 2021).

Na cultivar 1, apesar do incremento de 8% na germinação, verificou-se que os tratamentos com o filme não apresentaram diferenças significativas. Essa cultivar apresentou germinação superior ao padrão mínimo exigido pela legislação brasileira (80%) (Brasil 2013). Tais resultados sugerem que essa cultivar apresenta grande potencialidade para a produção de sementes comercializáveis nas condições edafoclimáticas estudadas.

Ao analisar as plântulas não se verificou interação significativa entre as cultivares e as doses do filme de óxido de cálcio aplicadas. Ao estudar os efeitos simples, a cultivar 1 apresentou plântulas com maior comprimento da parte aérea e maiores doses do filme, resultando em maiores valores para esta variável (Figura 5 C e D). Este resultado sugere o efeito do tratamento na expansão celular ou no acúmulo de biomassa durante o desenvolvimento da semente resultando em plântulas com maior parte aérea.

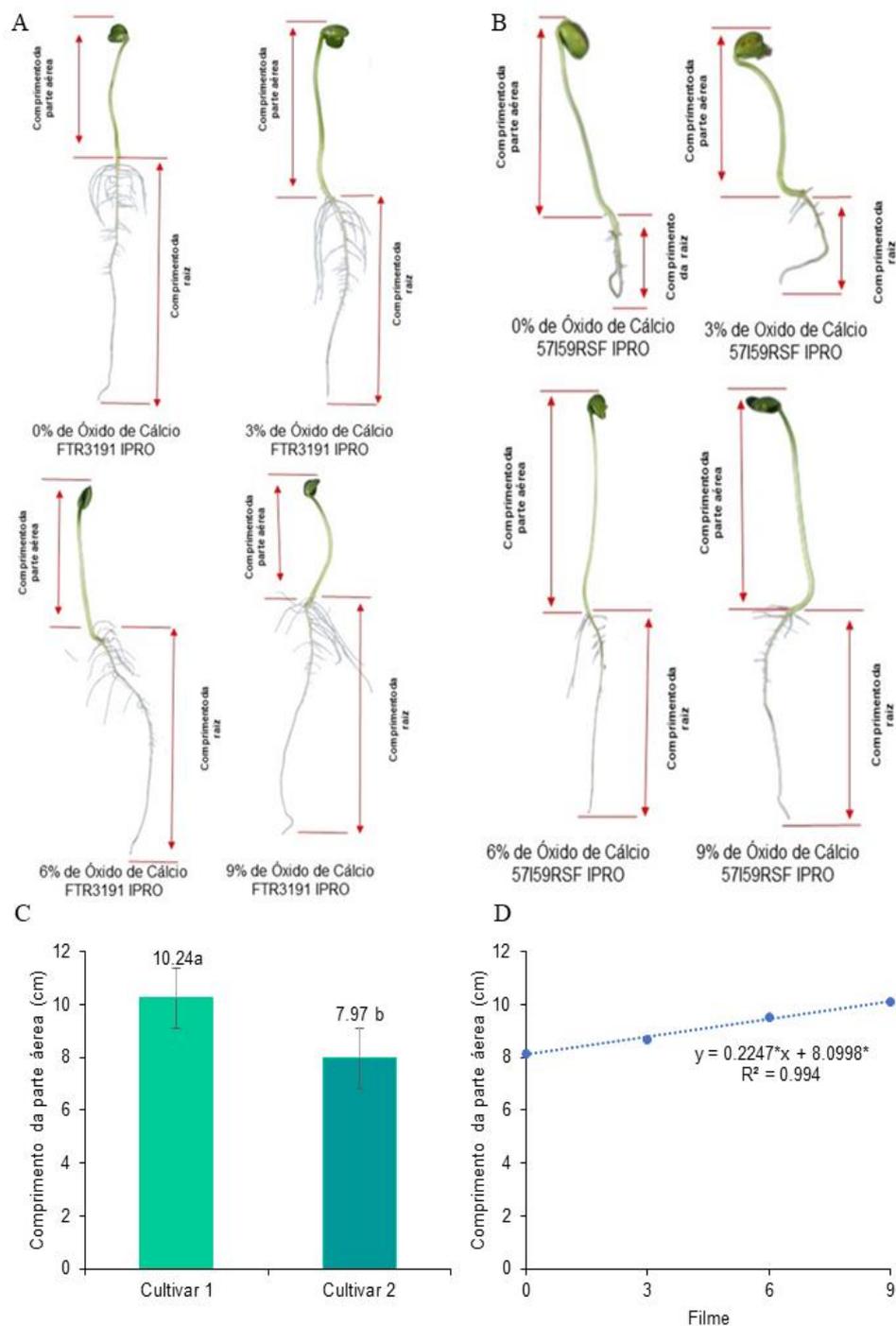


Fig. 5. Imagem das plântulas das duas cultivares de soja (FTR3191 PRO - C1 e 57i59RSF IPRO - C2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%) (A e B). Comprimento da parte aérea das plântulas (C e D). Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem a influência das médias das doses entre as cultivares (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$).

Ao analisar o comprimento da raiz e a massa seca das plântulas, observou-se uma interação significativa entre as diferentes cultivares e doses de filme de óxido de cálcio aplicadas. A cultivar 1 apresenta os maiores valores, contudo, nota-se que a cultivar 2 responde positivamente ao aumento das doses do filme, apresentando plântulas com raízes e massa seca

maiores nas concentrações mais altas do filme (Figura 6). Com as regressões quadráticas para ambas as variáveis (C e D), observou-se uma relação significativa entre as concentrações do filme e os parâmetros de crescimento para a cultivar 1 ($R^2 = 0,9961$ e $R^2 = 0,9959$, respectivamente), contrastando com regressões lineares para a cultivar 2 ($R^2 = 0,9681$ e $R^2 = 0,9398$, respectivamente).

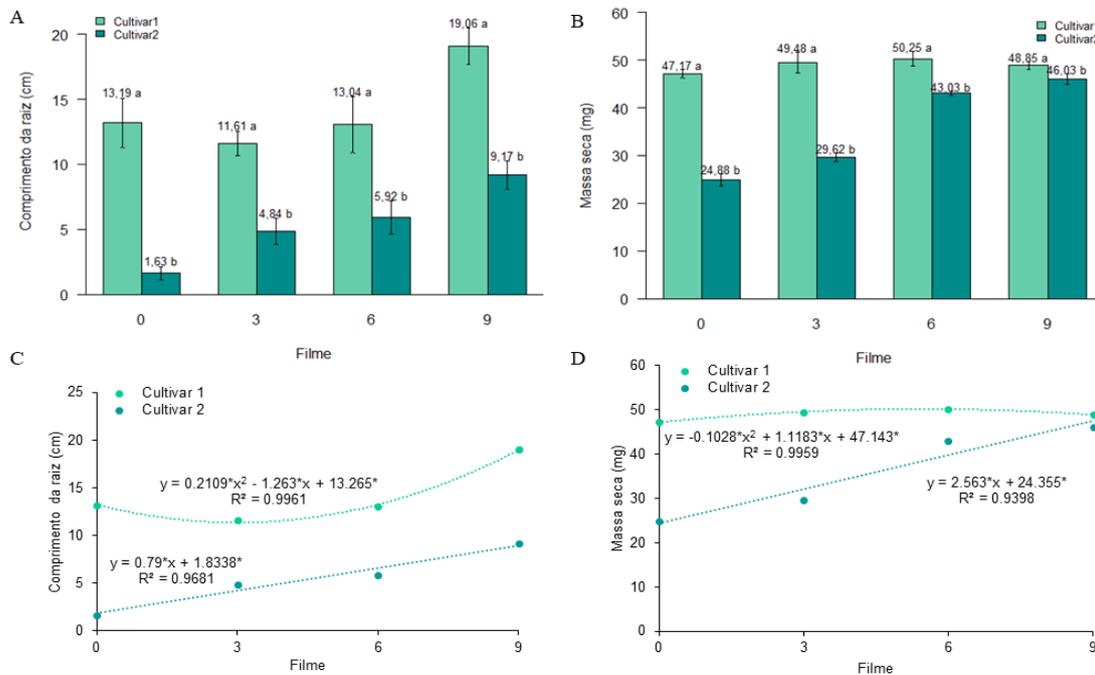


Fig. 6. Comprimento da raiz (cm) e massa seca (mg) de plântulas de duas cultivares de soja (FTR3191 PRO - C1 e 57i59RSF IPRO - C2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%). Médias seguidas das mesmas letras minúsculas nas barras não diferem das doses entre cultivares (pelo teste de Tukey, $p \leq 0,05$).

Ainda considerando as variáveis mensuradas para as plântulas, ao avaliar a massa fresca, verifica-se que na cultivar 2 sementes oriundas de plantas tratadas com doses mais altas do filme produziram massa frescas das plântulas mais pesadas (Figura 7), conforme observado para a o comprimento das raízes e massa seca, plântulas oriundas de sementes colhidas em plantas que receberam maior aplicação do filme de óxido de cálcio, apresentam também maior massa fresca. Esses resultados sugerem que a melhora da qualidade fisiológica das sementes desta cultivar permitiu a formação de plântulas maiores, ainda que não superiores à cultivar 1, que é adaptada à região.

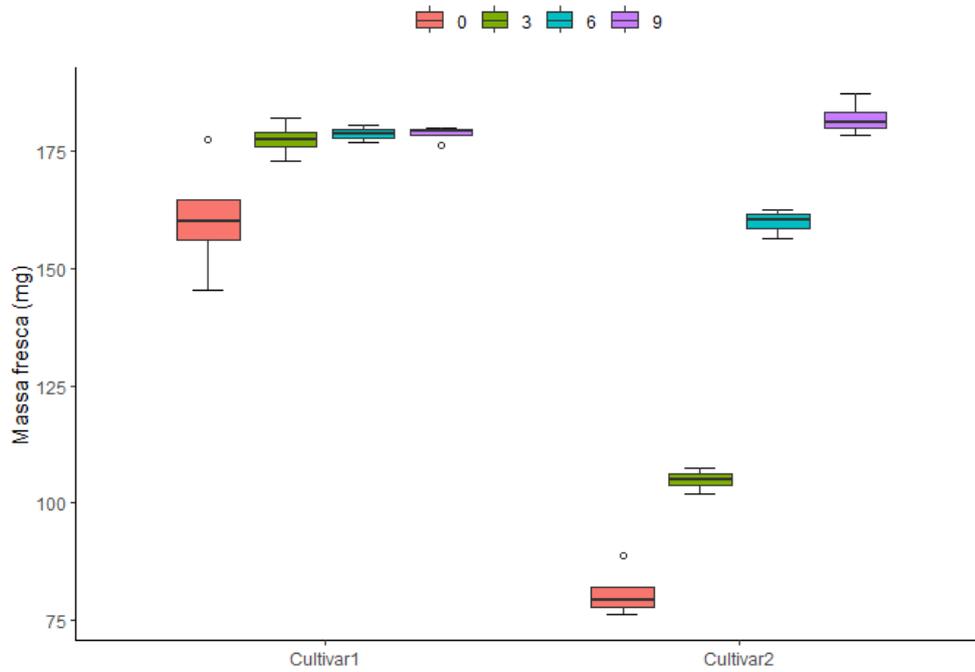


Fig. 7. Massa fresca (mg) de plântulas de duas cultivares de soja (FTR3191 PRO - C1 e 57i59RSF IPRO - C2) submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%).

A Análise de Componentes Principais (PCA) baseada nas características físicas e performance fisiológicas das sementes e plântulas (Figura 8), revelou padrões claros de influência das concentrações de filme de óxido de cálcio sobre as variáveis físicas e germinativas nas cultivares de soja. A dimensão principal (Dim1), que capturou a maior parte da variância, discrimina de forma eficaz os tratamentos. A Dim2, responsável por explicar 13,3% da variância, revela variações no impacto das dosagens de filme nas cultivares, onde observou-se uma diferenciação mais clara entre os tratamentos aplicados à C1 e C2, sendo a massa de mil sementes (M1000s) e o teor de água (TA) identificados como as variáveis com maior contribuição para esta dimensão.

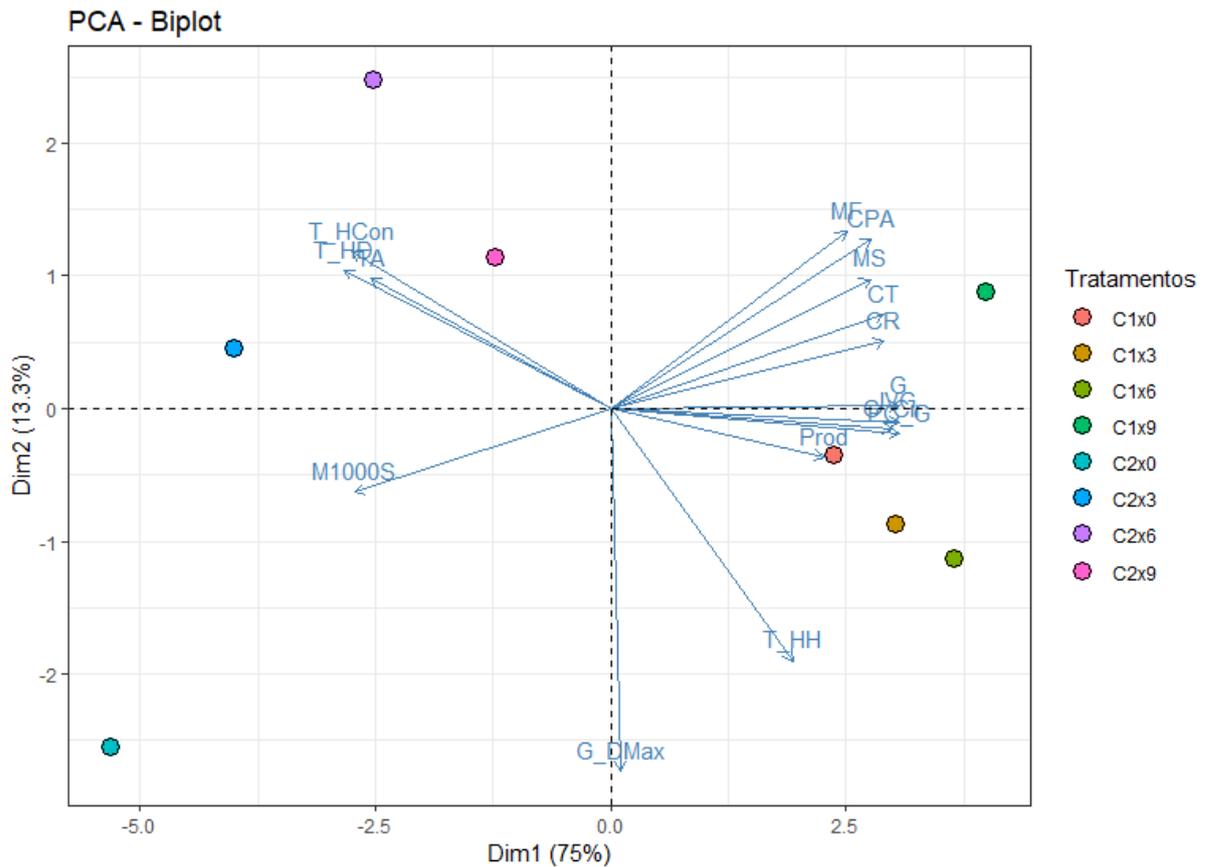


Fig. 8. Análise de Componentes Principais (PCA) para variáveis físicas e fisiológicas de sementes e plântulas de duas cultivares (FTR3191 PRO: cultivar 1 e 57i59RSF IPRO: cultivar 2) de soja submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%).

A matriz de correlação apresentada na Figura 9 fornece uma visão abrangente das inter-relações entre as características físicas e germinativas das sementes das cultivares sob concentrações de filme de óxido de cálcio. A forte correlação positiva entre a massa de 1.000 sementes ($M1000s$) e o teor de água (TA) destaca a interdependência entre o peso e a hidratação das sementes. Por outro lado, uma correlação negativa substancial é observada entre essas variáveis e a primeira contagem de germinação (PC_G), germinação (G) e o índice de velocidade de germinação (IVG), sugerindo que sementes mais pesadas e hidratadas podem ser menos propensas a uma germinação rápida e eficiente.

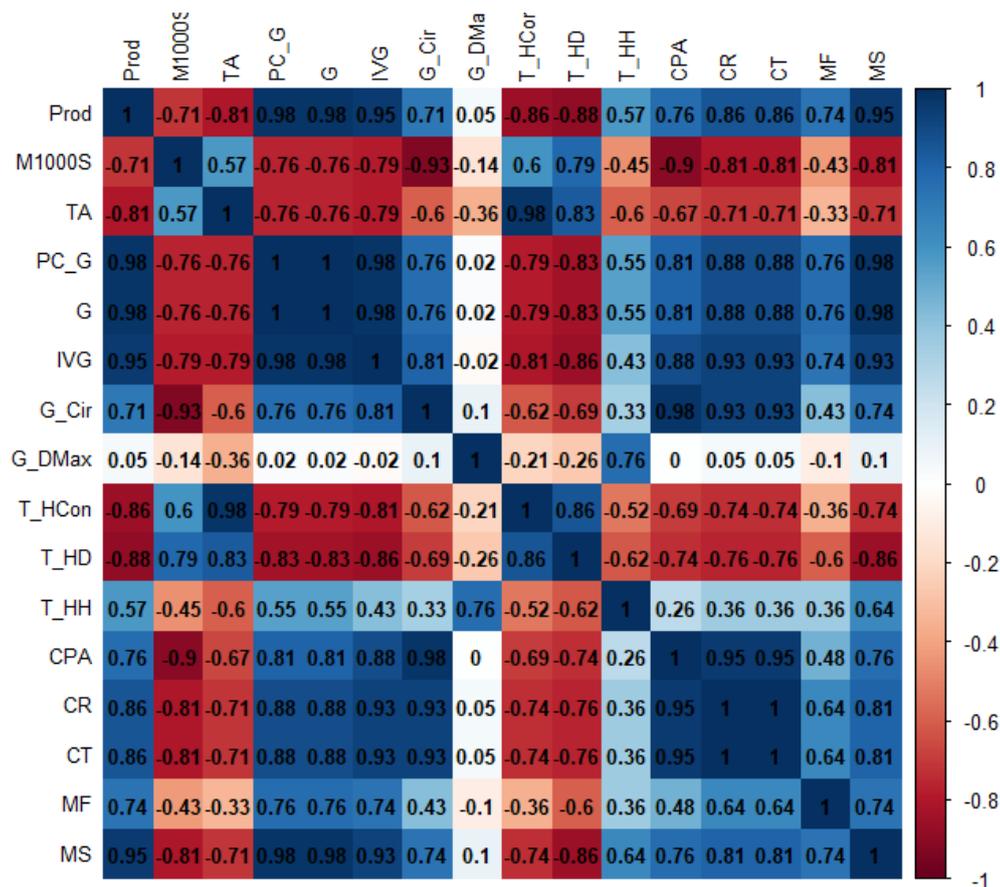


Fig. 9. Matriz de correlação de parâmetros físicos e fisiológicos de sementes e plântulas de duas cultivares (FTR3191 PRO - C1 e 57i59RSF IPRO - C2) de soja submetidas a doses crescentes de filme de óxido de cálcio (0, 3, 6 e 9%).

Os estudos sobre o efeito de filmes à base de óxido de cálcio em sementes de soja destacaram a variabilidade das respostas entre cultivares. Algumas mantêm suas propriedades físicas e potencial de germinação intactos, enquanto outras sofrem redução no crescimento tanto radicular quanto aéreo com o aumento da concentração do filme. A consistência morfológica e a preservação da qualidade visual das sementes em algumas concentrações do filme sugerem um potencial para sua utilização como método de proteção, desde que a dosagem seja criteriosamente ajustada para evitar efeitos negativos no crescimento das plântulas.

Investigar mais profundamente as interações entre os tratamentos e as diferentes cultivares de soja pode revelar os mecanismos subjacentes que regulam essas respostas e ajudar a otimizar os tratamentos para melhorar a produtividade das culturas. A técnica de análise de imagem demonstrou ser uma ferramenta valiosa para as características físicas, principalmente a textura e diâmetro, e das plântulas das sementes, apoiando a decisão sobre a concentração de filme mais adequada para cada cultivar específica.

5.4. Conclusões

O uso da concentração ótima de 9% para a germinação, índice de velocidade de germinação e primeira contagem da cultivar 2, não recomendada para plantio na área de estudo. As concentrações de filme de partícula não influenciaram de forma geral as características da textura e diâmetro máximo de ambas as cultivares estudadas. A cultivar 1 recomendada para a área de plantio, apresentou melhores resultados quanto à qualidade das sementes em relação à cultivar 2, não recomendada, independente das doses estudadas.

Este estudo preliminar indica que a aplicação do filme de partícula de cálcio é capaz de promover o aumento da produção de sementes de soja sem causar danos à sua qualidade. Dessa

forma, o presente estudo apresenta uma relevância agrônômica evidente ao fornecer orientações para o manejo das sementes e ao evidenciar a eficácia da aplicação do filme na soja em várias condições ambientais. Sugerimos que novos estudos foquem na busca por outros materiais além do cálcio, para barateamento da técnica e uso na produção dos filmes de cobertura das folhas, também é interessante testar a viabilidade da aplicação do filme de cobertura por drones e comparar seu custo com a aplicação manual.

5.5. Referências Bibliográficas

- ACHA, A. J.; VIEIRA, H. D. Digital image processing of coated perennial-soybean seeds. **Journal of Seed Science**, v. 42, p. 12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v42227516>
- AMBIKA, S.; MANONMANI, V.; SOMASSUNDARAN, G. Review of effect of seed size on seedling vigour and seed yield. **Research Journal of Seed Science**, v.7, n.2, p.31-88, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3923/rjss.2014.31.38>
- ANDRADE, D.B.; CARVALHO, E.R.; PIRES, D. K.R.; PEREIRA, W.V.S.; PINHO, E,V.R.V. Artificial intelligence tools and a diagrammatic scale for evaluating the quality of coating in treated soybean seeds. **Neural Computing and Applications**, v.36, pp.3101–3106, 2024. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/s00521-023-09182-9\(0123456789\).-volV\(0123](https://doi.org/10.1007/s00521-023-09182-9(0123456789).-volV(0123)
- BARRETO, R. F.; DE MELLO PRADO, R.; LÚCIO, J. C. B.; LÓPEZ-DÍAZ, I.; CARRERA, E.; CARVALHO, R. F. Ammonium toxicity alleviation by silicon is dependent on cytokinins in tomato cv. Micro-Tom. **Journal of Plant Growth Regulation**, v.41, n.1, p.417-428, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10314-5>
- BRADFORD, K.J. **Water relations in seed germination. In: Seed Development and Germination**. 1 ed. Nova Iorque, pp. 351-396, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780203740071>
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399p.
- BRASIL. **Padrões para Produção e Comercialização de Sementes de Soja. [Minimum Standards for Production and Marketing of Soya bean Seeds]**, Instrução Normativa n° 45, de 17 de setembro de 2013, Publicação: D.O.U. do 20/09/13, Seção 1, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, 2013.
- BURTON, M.G.; LAUER, M.J.; McDONALD, M.B. Crop Science, **Madison**, v.40, p.476-482, 2000.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para agropecuária**, v.6, 2019. Safra 2020/2021. <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-estimativa-de-evolucao-graos.html>
- COTRIM, M. F.; GAVA, R.; CAMPOS, C. N. S.; DE DAVID, C. H. O.; REIS, I. D. A.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E. Physiological Performance of Soybean Genotypes Grown under Irrigated and Rainfed Conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 1, p. 34–43, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jac.12448>.
- DINIS, L. T.; MALHEIRO, A. C.; LUZIO, A.; FRAGA, H.; FERREIRA, H.; GONÇALVES, I.; PINTO, G.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J. Improvement of grapevine physiology and yield under summer stress by kaolin-foliar application: water relations, photosynthesis and oxidative damage. **Photosynthetica**, v. 56, n. 2, p. 641–651, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0714-3>
- GUEDES, M.A.; MATA, M.E.R.M.C.; DUARTE, M.E.M.; FARIAS, P.A. Caracterização física de grãos de soja utilizando-se processamento digital de imagens. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.13, n.3, p.279-294, 2011. Disponível em: DOI:10.15871/1517-8595/rbpa.v13n3p279-294

- HARTER, F. S.; BARROS, A. C. S. A. Cálcio e silício na produção e qualidade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n. 1, p. 54–60, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222011000100006>
- IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M.I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J.B.R.; MAYCOCK, T.K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, 2021. doi:10.1017/9781009157896.
- IQBAL, N.; HUSSAIN, S.; RAZA, M.A.; YANG, C.Q.; SAFDAR, M.E.; BRESTIC, M.; AZIZ, A.; HAYYAT, M.S.; ASGHAR, M.A.; WANG, X.C.; ZHANG, J.; YANG, W.; LIU, J. Drought Tolerance of Soybean (*Glycine max* L. Merr.) by Improved Photosynthetic Characteristics and an Efficient Antioxidant Enzyme Activities Under a Split-Root System. **Frontiers in Physiology**, v. 10, p.786, 2019. Disponível em: [https://doi:10.3389/fphys.2019.00786](https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00786)
- KUMAR, V.; SOLANKI, K. R. Techniques for evaluation and quantification of seed quality and viability. **Plant physiology**, v.123, n.4, p. 829-834, 2005.
- LIU, B.; ZHOU, X.; QU, D. Relationship among seed size from different seed positions at several seeded pod in soybean. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 10, p.768-771, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287779888_Relationship_among_seed_size_from_different_seed_positions_at_several-seeded_pod_in_soybean
- MAGUIRE, J. D. Speed of germination-aid seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison, v. 2, n. 2, p. 176-177, Mar./Apr. 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- MEDEIROS, A.D.; PEREIRA, M.D.; SILVA, I.R.F.; CAPOBIANGO, N.P.; FLORES, M.E.P. Vigor of maize seeds determined by a free image analysis system. **Revista Ciência Agronômica**, v.50, n. 4, p.616-624, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190073>
- MEDEIROS, A.D.; PEREIRA, M.D.; SILVA, J.A. Processamento digital de imagens na determinação do vigor de sementes de milho. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, n.3, p.1-7, 2018. Disponível em: <http://doi:10.5039/agraria.v13i3a5540>
- OLIVEIRA JÚNIOR, L. F. G.; SANTOS, P. L. de S.; LIMA, R. S. N. de; SILVEIRA, M. P. C.; FAGUNDES, J. L.; CARNELOSSI, M. A. G.; REIS, F. de O. Physiological parameters of cowpea treated with CaO-based particle film and subjected to water restriction. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00033>
- OLIVEIRA, A.; DINIS, L.-T.; SANTOS, A.A.; FONTES, P.; CARNELOSSI, M.; FAGUNDES, J.; OLIVEIRA-JÚNIOR, L. Particle Film Improves the Physiology and Productivity of Sweet Potato without Affecting Tuber's Physicochemical Parameters. **Agriculture**, v.12, n.4, p.558, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture12040558>
- PINTO, C.A.G.; KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; DOURADO-NETO, D.; SILVA, C. B. DA; MARCOS-FILHO, J. Relationship between size and physiological potential of soya bean seeds under variations in water availability. **Seed Science and Technology**, v. 46, n.3, p. 497-510, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15258/sst.2018.46.3.07>
- RIBEIRO, L. K. M. **Análise de imagens de plântulas para a avaliação do potencial fisiológico de sementes de soja**. 2021. 34p. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Bioenergia e Grãos) - Instituto Federal Goiano, Rio Verde-GO, 2021.

- SCHWALBERT, R. A.; AMADO, T.; CORASSA, G.; POTT, L. P.; PRASAD, P. V. V.; CIAMPITTI, I. A. Satellite-based soybean yield forecast: Integrating machine learning and weather data for improving crop yield prediction in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, 284, p. 107886, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107886>
- SFREDO, G.J.; OLIVEIRA, M.C.N. DE. **Soja: Molibdênio e Cobalto**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. 36p. (Embrapa Soja. Documentos, 322)
- SILVA, P. S. O. DA; OLIVEIRA, L. F. D. G.; MATTOS, E. C. DE; MACIEL, L. B. D. S.; SANTOS, M. P. F. DOS; SENA, E. D. O. A.; BARBOSA, N. T. B.; CARNELOSSI, M. A. G.; FAGUNDES, J. L. Calcium particle films promote artificial shading and photoprotection in leaves of American grapevines (*Vitis labrusca* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 252, p. 77–84, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.03.041>
- TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TAIZ, L.; ZEIGER. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.
- TORRES, S. B.; BALBINO, D. A.; SANTOS, W. G.; NOGUEIRA, N. W.; FREITAS, R. M.; LEITE, M. S. Avaliação do vigor de sementes de rúcula pela atividade respiratória. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 4, p. 561-564, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-053620160416>
- VINHAL-FREITAS, I.C.; NUNES-JUNIOR, J.E.G.; SEGUNDO, J.P.; VILARINHO, M.S. Germinação e vigor de sementes de soja classificadas em diferentes tamanhos. [Effects of soybean seed size on germination and vigor]. **Agropecuária Técnica**, v.32, p.108-114, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.25066/agrotec.v32i1.9567>
- ZHANG, C.; SI, Y.; LAMKEY, J.; BOYDSTON, R.; GARLAND CAMPBELL, K.; SANKARAN, S. High-throughput phenotyping of seed/seedling evaluation using digital image analysis. **Agronomy**, v.8, n.5, p.1-14, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy8050063>
- ZHU, X.-G.; ORT, D. R.; PARRY, M. A. J.; VON CAEMMERER, S. A wish list for synthetic biology in photosynthesis research. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 7, p. 2219–2225, 6 abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa075>.
- ZUCHI, J. Refinamento da qualidade de sementes de soja na unidade de beneficiamento. **Revista Plantar**, v. 74, p. 22-23, 2015.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de filme à base de CaO é uma tecnologia inovadora que permite o aumento da produtividade e da qualidade da semente de soja em virtude dos benefícios proporcionados no funcionamento do aparato fisiológico por meio da fotoproteção. Em cultivar recomendada para a região possibilitou um aumento de 96% na produção e garantiu maior germinação e vigor das sementes não alterando as características físicas.