



INSTITUTO FEDERAL
Goiano

Campus
Rio Verde

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE
ENGENHARIA AMBIENTAL**

VITÓRIA GABRIELE REZENDE MARTINS

**IMPACTOS DO FLUORETO DE CÁLCIO NO
DESENVOLVIMENTO DE *Lactuca sativa L.***

**RIO VERDE - GOIÁS
2026**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE**

VITÓRIA GABRIELE REZENDE MARTINS

**IMPACTOS DO FLUORETO DE CÁLCIO NO
DESENVOLVIMENTO DA *Lactuca sativa L.***

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto
Federal Goiano – Câmpus Rio Verde, como
requisito parcial para a obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental.
Orientadora: Profa. Dra. Juliana de Fátima
Sales
Coorientador: Prof. Arthur Almeida Rodrigues

RIO VERDE - GOIÁS

2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

M386i Rezende Martins, Vitória Gabriele
IMPACTOS DO FLUORETO DE CÁLCIO NO
DESENVOLVIMENTO DE Lactuca sativa L. / Vitória Gabriele
Rezende Martins. Rio Verde 2026.
43f. il.
Orientadora: Prof^ª. Dra. Juliana de Fátima Sales.
Coorientador: Prof. Dr. Arthur Almeida Rodrigues.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220074 -
Bacharelado em Engenharia Ambiental - Integral - Rio Verde
(Campus Rio Verde).
1. Lactuca sativa L.. 2. Fluoreto de cálcio. 3. Fluorescência da
clorofila. 4. Germinação. 5. Bioindicador. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

/ /



Documento assinado digitalmente
VITÓRIA GABRIELE REZENDE MARTINS
Data: 20/05/2026 14:51:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Local

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



Documento assinado digitalmente
JULIANA DE FATIMA SALES
Data: 25/05/2026 09:59:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 41/2026 - DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 29 dias do mês de abril de 2026, às 07 horas e 30 minutos, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: **Juliana de Fátima Sales, orientadora, Arthur Almeida Rodrigues, membro interno, Édio Damásio da Silva Júnior, membro interno e Bruno de Oliveira Costa Couto, membro interno**, para examinar o Trabalho de Curso intitulado **IMPACTOS DO FLUORETO DE CÁLCIO NO DESENVOLVIMENTO DE *Lactuca sativa* L.** da estudante VITÓRIA GABRIELE REZENDE MARTINS, Matrícula nº 2019102200740077 do Curso de Engenharia Ambiental do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida a estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição da candidata pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** da estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Rio Verde, 29 de abril de 2026.

(Assinado Eletronicamente)

Juliana de Fátima Sales

Orientadora

(Assinado Eletronicamente)

Arthur Almeida Rodrigues

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Édio Damásio da Silva Júnior

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Bruno de Oliveira Costa Couto

Membro

Documento assinado eletronicamente por:

- **Juliana de Fatima Sales**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 29/04/2026 16:50:49.
- **ARTHUR ALMEIDA RODRIGUES**, ARTHUR ALMEIDA RODRIGUES - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 30/04/2026 07:52:28.
- **Edio Damasio da Silva Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 30/04/2026 17:08:12.
- **Bruno de Oliveira Costa Couto**, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - CCBEAMB-RV , em 03/05/2026 05:59:44.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 29/04/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 814729

Código de Autenticação: bc8e9850c6



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus pela saúde e força ao longo desta jornada. À minha família, especialmente meus pais Rose e João e minha irmã Isabella, à Liane, grande amiga da família, e ao meu querido noivo, Marcos Vinícius, pelo apoio incondicional e por contribuírem para meus estudos. A todos vocês, minha eterna gratidão.

A toda equipe do Laboratório de Sementes que me acolheram e foram essenciais durante minha trajetória acadêmica e na conclusão deste trabalho. Em especial, agradeço a Arthur, Cassia, Professora Juliana, Anderson, Ingrid, Thyago, Thais, que contribuíram significativamente para minha formação científica durante a iniciação científica e a elaboração deste trabalho.

Agradeço aos amigos de faculdade, Maria Eduarda Guimarães, Bruna, Marcos, Julia, Gabriela, Lucas, Guilherme e Diandra. E amigos fora da faculdade Maria Eduarda Baldin.

Dedico este trabalho a Deus que me fortalece todos os dias, a minha família, todos do Laboratório de Sementes e a todos que fizeram parte desta caminhada, meu agradecimento. Que este fim de ciclo marque o começo de novos desafios e conquistas ainda maiores.

MARTINS, Vitória Gabriele Rezende. **Impactos Do Fluoreto De Cálcio No Desenvolvimento Da *Lactuca sativa L.***, 2026. 43 p Trabalho Científico com Experimento - Curso de Bacharelado de Engenharia Ambiental. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano– Câmpus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2026.

RESUMO

A alface (*Lactuca sativa L.*) é uma hortaliça de ciclo curto amplamente cultivada e sensível à presença de contaminantes ambientais, como o fluoreto de cálcio (CaF_2), a hortaliça pode apresentar alterações que comprometem seu desenvolvimento, assim podem ser observadas no dia a dia ou em análises laboratoriais, devido a esse comportamento a alface atua como bioindicador. Nesse contexto, objetivou-se avaliar os efeitos como possível potencial poluidor do CaF_2 no desenvolvimento inicial de *Lactuca sativa L.*, analisando parâmetros de germinação, crescimento radicular, índice de velocidade de germinação (IVG), fluorescência da clorofila e alterações anatômicas foliares. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com cinco concentrações de CaF_2 (0, 5, 10, 15 e 20 mg L^{-1}) e quatro repetições, distribuídas em duas etapas experimentais. Os resultados indicaram que a exposição ao fluoreto de cálcio afetou parâmetros fisiológicos e estruturais das plantas. Observou-se alteração no processo germinativo e no vigor das sementes, bem como modificações anatômicas nas folhas, caracterizadas pela desorganização dos tecidos à medida que as concentrações de CaF_2 aumentaram. Dessa forma, o CaF_2 em doses a partir de 15mgL^{-1} pode provocar um potencial risco ao desenvolvimento inicial da cultura, comprometendo a germinação, índice de velocidade de germinação e crescimento de plântula, sendo assim, a *Lactuca sativa L.* através de análises laboratoriais e estudos comprova ser uma ferramenta bioindicadora eficiente e de baixo custo.

Palavras-chave: Fitotoxicidade; Fluoreto; Fluorescência da clorofila; Germinação; Bioindicador.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Passo a passo da metodologia do projeto de chuva simulada. Elaborado com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT/DALL·E, 2026)..... 19
- Figura 2** - Efeito do fluoreto de cálcio (CaF_2) na germinação de sementes de alface para o controle, e condicionamento com as concentrações de 0,0; 5,0; 10; 15 e 20 mg L-1. Colunas verticais representam a média de cinco repetições com barras indicando o erro padrão. Os asteriscos indicam diferenças a 5% (*) e 1% (*) de probabilidade. 21
- Figura 3** - Efeito do fluoreto de cálcio (CaF_2) no índice de velocidade de germinação de sementes de alface para o controle, e condicionamento com as concentrações de 0,0; 5,0; 10; 15 e 20 mg L-1. Colunas verticais representam a média de cinco repetições com barras indicando o erro padrão. Os asteriscos indicam diferenças a 5% (*) e 1% (*) de probabilidade. 22
- Figura 4** - Dados de análise de Fluorescência da Clorofila de *Lactuca sativa L.*, plântulas após 7 dias de exposição ao Fluoreto de Cálcio (CaF_2) em câmara de crescimento na dose de 0 mg L-1, 5 mg L-1, 10 mg L-1, 15 mg L-1 e 20 mg L-1. Rendimento quântico máximo do fotossistema II (PSII) (F_v/F_m), Fluorescência mínima ($F_o'1$) rendimento quântico efetivo do PSII(Y_{II}), suspensão da dissipação não fotoquímica regulada (YNPQ), rendimento da dissipação de energia $Y(NO)$, taxa de transporte de elétrons (ETR)..... 24
- Figura 5** -Análise dos componentes principais (PCA) de dados de qualidade e vigor de sementes, PG (porcentagem de germinação), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento de plântula (CP), dados de fluorescência de imagem, rendimento quântico potencial do PSII (F_v/F_m), fluorescência inicial (F_0), rendimento quântico efetivo do Y_{II} , rendimento quântico de dissipação de energia não regulamentada do PSII $Y(NO)$, rendimento de extinção não fotoquímica (YNPQ) e taxa de transporte de eletros (ETR). 30

TABELAS

Tabela 1 - Comprimento de plântulas de acordo com o teste de Dunnett a nível 5% de variância.....	23
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO DE LITERATURA	11
	2.1 <i>Lactuca sativa L.</i>	11
	2.2 Fluoreto	13
	2.3 Uso do fluoreto de cálcio em defensivos e adubos agrícolas.....	14
	2.4 <i>Lactuca sativa L.</i> como bioindicador de fitotoxicidade.....	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS	17
	3.1 Materiais e locais do experimento.....	17
	3.2 Germinação, índice de velocidade de germinação e comprimento de plântula ..	17
	3.3 Fluorescência de imagem de plântulas.....	18
	3.4 Projeto de chuva simulada e sintomas visíveis	18
	3.5 Caracterização anatômica.....	19
	3.6 Análise estatística.....	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	21
	4.1 Germinação, IVG e comprimento de plântula	21
	4.2 Fluorescência de clorofila	23
	4.3 Projeto de chuva simulada e sintomas visíveis	25
	4.4 Análises anatômicas	27
	4.5 Análise de componentes principais (PCA)	29
5	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa L.*) é uma hortaliça amplamente cultivada e uma das mais consumidas no mundo, devido ao seu valor nutricional e à facilidade de produção. Essa espécie constitui uma importante fonte de vitaminas e sais minerais, sendo amplamente utilizada na alimentação humana (Lana, 2010). Além disso, caracteriza-se por apresentar ciclo curto de cultivo e elevada demanda de mercado. (Gadi, *et al.*, 2021). A alface mesmo sendo adaptável e presente durante todas as épocas do ano, pode ser sensível quando submetidas a níveis de estresse pode ser utilizada como uma possível potencial bioindicadora (Izquierdo-díaz *et al.*, 2023). A hortaliça com a capacidade de absorção, pelas raízes e estômatos, além dos nutrientes, poluentes podem ser absorvidos, podendo causar alterações visuais e perturbações nos organismos (Araújo; El-Deir; Tavares, 2022).

Em regiões de plantio próximas as indústrias na fabricação de tijolos, cerâmicas e vidros foram encontrados casos de contaminação em plantas por fluoreto presente na atmosfera (Fortes *et al.*, 2003). A absorção do fluoreto acontece através das folhas pelos estômatos (Miller, 1993 ; Chaves *et al.*, 2002). O aumento da concentração de fluoretos pode afetar diferentes processos fisiológicos das plantas, incluindo germinação, crescimento radicular, desenvolvimento anatômico e atividade fotossintética (Kumari; Dhankhar; Abrol, 2023). A alface é uma excelente alternativa

O flúor é um elemento naturalmente presente no ambiente, sendo encontrado em rochas e minerais. Por meio de processos naturais de erosão e intemperismo, compostos de fluoretos podem ser liberados e transportados para diferentes compartimentos ambientais, como águas subterrâneas, rios e solos (Chahine *et al.*, 2024). Além das fontes naturais, a presença de fluoretos no ambiente também pode ser intensificada por atividades antrópicas, como a aplicação de fertilizantes fosfatados, processos industriais e o descarte inadequado de resíduos químicos (Chahine *et al.*, 2023). O fluoreto no abastecimento público é regulamentado pela Lei nº 6.050/1974 e pela Portaria nº 635/1975, onde o elemento em doses baixas de 0,6 a 0,8 mg L⁻¹ de fluoreto (F⁻) com o intuito de garantir benefícios na saúde bucal.

A presença de fluoretos em sistemas agrícolas pode comprometer a qualidade dos alimentos produzidos e representar riscos à saúde humana quando consumidos em excesso. Além disso, o uso intensivo de fertilizantes químicos pode agravar essa contaminação, tornando essencial a adoção de práticas agrícolas sustentáveis para reduzir a exposição aos fluoretos.

A presença de fluoreto de cálcio (CaF₂) em sistemas de cultivo pode afetar o desenvolvimento das plantas. Esses efeitos podem ser observados ao longo das diferentes fases de crescimento vegetal. O CaF₂ tem sido objeto de preocupação devido aos seus potenciais

impactos negativos sobre o metabolismo das plantas, podendo dificultar a absorção de nutrientes e promover o acúmulo excessivo de fluoretos em diferentes tecidos vegetais (Chahine *et al.* 2024).

Nesse sentido, testes de germinação podem atuar como importantes indicadores da qualidade ambiental e da presença de contaminantes (Chahine *et al.*, 2023). Estudos conduzidos com irrigação contendo fluoretos em *Phaseolus vulgaris* L. demonstraram redução nas taxas de germinação, alterações na atividade metabólica inicial e diminuição do vigor das plantas quando expostas a concentrações superiores a 15 mg L⁻¹ (Chahine *et al.*, 2023, Dixit *et al.*, 2024, Silva *et al.*, 2022).

A exposição a esses compostos pode comprometer o crescimento vegetal, afetando a capacidade de absorção de água e nutrientes (Zhang; Liu, 2021). Além disso, podem ocorrer alterações anatômicas, como redução da espessura foliar, necrose celular e modificações estruturais nos tecidos vegetais (Gomes *et al.*, 2021, Zha *et al.*, 2019). Essas alterações podem comprometer a produtividade e a qualidade comercial das culturas, tornando importante a determinação de limites de tolerância a esses contaminantes para o manejo sustentável dos sistemas agrícolas (Sant'anna-Santos *et al.*, 2021). O comportamento das plantas pode ser utilizado como método de avaliação de toxicidade de algum componente, a concentração de poluentes causa alterações de médio a longo prazo, que podem ser observadas no dia a dia ou em análises laboratoriais (ZATELLI, 2019).

Charles *et al.* (2011) utilizaram a *Lactuca sativa* L. como organismo bioindicador, visando detectar e avaliar os efeitos de contaminantes sobre o meio ambiente de forma, rápida e de baixo custo, neste caso a avaliação foi submetida a metais pesados presentes na água. Outros estudos, propõem as hortas urbanas para monitoramento da qualidade do ar, a Organização Mundial da Saúde relata sobre a poluição do ar e a ameaça à saúde pública (OMS, 2021), e o biomonitoramento da qualidade do ar é uma excelente alternativa, como no estudo de Izquierdo-díaz *et al.* (2023), usaram as hortas urbanas com o objetivo de monitoramento da qualidade do ar e verificar se as produções estão aptas para o consumo, para isso utilizaram diferentes locais da cidade de Copenhague.

Nesse contexto, objetivou-se avaliar os impactos como possível potencial poluidor do CaF₂ no desenvolvimento inicial de *Lactuca sativa* L., analisando parâmetros de germinação, crescimento radicular, índice de velocidade de germinação (IVG), fluorescência da clorofila e alterações anatômicas foliares.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 *Lactuca sativa* L.

A alface (*Lactuca sativa* L.) é a hortaliça folhosa mais consumida no Brasil e no mundo, sendo originária das regiões do Mediterrâneo e pertencente à família Asteraceae. (Maldonade, 2014). Quem lidera a produção de alface no mundo é a China, com 53% de participação no mercado e 28 milhões de toneladas no ano de 2023 (Freshdi, 2025). Já no Brasil, a Agência de Notícias do Governo do Estado de São Paulo (2026), São Paulo quem se destaca na produção, foram cultivadas mais 220 mil toneladas de alfases no ano de 2025.

Os principais canais de comercialização incluem mercados, hortifrutigranjeiros, feiras livres, além da venda direta entre produtores e consumidores finais (Sanjuan Montebello *et al.*, 2024). Esse comércio desempenha um papel significativo na economia, gerando renda, particularmente para pequenos produtores rurais, ao mesmo tempo em que promove práticas agrícolas sustentáveis (Silva *et al.*, 2020)

Existem diferentes cultivares de alface, que variam quanto à coloração das folhas, podendo apresentar tonalidades verdes ou arroxeadas. Além disso, há variações na morfologia foliar, incluindo diferenças no formato, tamanho, textura e grau de crocância das folhas. (Filgueira, 2013; Rodrigues *et al.*, 2022).

Essa hortaliça demonstra grande capacidade de adaptação a climas amenos. Em condições de temperatura elevadas, seu desenvolvimento pode ser acelerado, resultando em crescimento precoce e redução de tamanho, o que reduz a qualidade comercial da hortaliça (Henz, 2009).

O consumo de alface está associado à ingestão de compostos antioxidantes importantes para a saúde humana. Esta hortaliça dispõe um elevado valor nutricional, sendo rica em vitaminas e minerais essenciais para o bom funcionamento do organismo, como as vitaminas C, E e B9 (Suleria *et al.*, 2022). Pesquisas também sugerem que a alface possui propriedades anticancerígenas, devido à presença de compostos bioativos, como o β -caroteno, o ácido ascórbico (vitamina C) e a clorofila, que possuem potentes ações antioxidantes. Ademais, a hortaliça exerce uma atividade enzimática que facilita a digestão dos carboidratos e contribui para o controle dos níveis de glicose no sangue, desempenhando um papel importante no manejo da diabetes (Altunkaya *at al.*, 2009; Suleria *et al.*, 2022).

Para que a alface se desenvolva adequadamente, é necessário manter o solo com níveis adequados de umidade, evitando tanto o déficit hídrico quanto o encharcamento. O excesso de água pode favorecer o surgimento de doenças e o apodrecimento das raízes, enquanto a escassez hídrica pode resultar em folhas com sabor mais amargo (Garrido, 2023).

Mesmo seguindo cuidadosamente com a metodologia adequada de plantio, outros fatores como a poluição do ar podem gerar problemas no desenvolvimento e qualidade da planta, então plantações próximas a indústrias, que possuem fluoreto nas emissões são capazes de influenciar no desenvolvimento da alface (Fuge, 2019). O fluoreto de cálcio CaF_2 é um mineral amplamente utilizado em diversas indústrias, incluindo a metalúrgica, a fabricação de alumínio, a produção de cerâmicas, vidros, fibra de vidro e esmaltes, além de sua aplicação na área odontológica. Essas atividades demandam um material com altos pontos de fusão, elevada dureza e baixa solubilidade em água. No entanto, embora o fluoreto de cálcio seja vantajoso para tais processos industriais, quando ele entra em contato com o solo e a água, pode causar contaminação, o que gera preocupações ambientais (Da Silva Lobato, 2013), (Garbeloini et al., 2024). Dessa forma, a presença desse composto no ambiente pode representar risco potencial para o desenvolvimento vegetal.

A exposição de hortaliças ao fluoreto de cálcio pode ocorrer por diferentes vias: por meio do uso de fertilizantes contaminados, da proximidade com indústrias que emitem esse composto ou quando a água utilizada para irrigação está contaminada. A capacidade de absorção de contaminantes pelas plantas é influenciada pelo tipo de solo. Solos argilosos, por exemplo, possuem uma estrutura porosa que favorece a adsorção de minerais e metais pesados. (Chagas, 2021).

As folhas das plantas são capazes de absorver nutrientes e partículas indesejáveis pelos seus tecidos através dos estômatos (Chaves, 2002). Em atividades industriais, compostos contendo flúor podem ser liberados na atmosfera, podendo posteriormente ser transportados pelas precipitações (Singh *et al.*, 2018). Estas situações são motivo de redução da espessura do mesófilo que podem prejudicar seu desenvolvimento (Sant'anna-Santos, 2013).

Os efeitos bioquímicos resultam em sintomas visíveis, como necrose foliar, redução do crescimento e menor teor de clorofila, prejudicando a eficiência fotossintética e o desenvolvimento das hortaliças (Taiz *et al.*, 2017; Marschner, 2012). Os mecanismos pelos quais as hortaliças absorvem poluentes incluem o sistema radicular, a disposição de compostos pelo ar e a irrigação com água contaminada.

O flúor tem a capacidade de causar descoloração e necrose nas folhas das plantas, afetando a conversão de luz em energia química durante a fotossíntese. Entre os principais mecanismos de toxicidade do fluoreto, é notável a inibição de enzimas metabólicas afetadas pelo fluoreto, capaz de comprometer a produção de energia, na cadeia respiratória e na fosforilação oxidativa, impedimento da conversão de substratos em produtos finais e transporte de solutos através da membrana (Pandey *et al.*, 2024). Outro mecanismo capaz de ser atingido pelo

fluoreto é a fotossíntese, onde os cloroplastos são afetados, a clorofila que se torna alvo da ação fitotóxica do fluoreto, reduzindo o teor de clorofila (Kamiński *et al.*, 2024).

Assim, o acúmulo de amido nos cloroplastos pode inibir a respiração celular, prejudicando ainda mais o crescimento das plantas (Rodrigues *et al.*, 2017). Portanto a ação do fluoreto atua sobre a combinação de efeitos bioquímicos e fisiológicos, afetando absorção de nutrientes e capacidade fotossintética das hortaliças.

2.2 Fluoreto

O flúor é um elemento químico altamente reativo pertencente ao grupo dos halogênios. (Prystupa, 2011). O fluoreto de cálcio (CaF_2) é um composto inorgânico que se apresenta como um cristal cúbico incolor com elevada pureza, pertencente ao grupo dos halogenetos metálicos alcalino-terrosos. Sua ocorrência natural se dá principalmente na forma do mineral fluorita (também denominado fluoreto), que constitui uma das principais fontes minerais de flúor exploradas comercialmente, apresentando teores de CaF_2 que podem exceder 97% em depósitos de alta qualidade (Nanni, 2008; Fluorita, 2021).

O flúor é um elemento encontrado na crosta terrestre (Hanley e Koga, 2018), sugerem uma estimativa de 557 mg kg^{-1} (RUDNICK; GAO, 2014). A partir do flúor, outros minerais foram identificados nas rochas pegmatíticas, como o CaF_2 (Funge, 2019). A fluorita é o mineral extraído em larga escala, ela é formada pelos fluidos hidrotermais, classificados como geológicos, como depósitos associados a carbonatitos, granitos diferenciados e ambientes vulcânicos (Hayes *et al.*, 2017).

Algumas rochas, como os granitos, podem conter fluoretos em sua composição. Quando essas rochas estão localizadas no subsolo próximo a aquíferos, a água pode absorver pequenas quantidades de flúor (Abiye, Bybee & Leshomo, 2018). No Brasil, regiões se o solo contiver níveis significativos de fluoreto, provenientes de agrotóxicos ou de atividades industriais, o escoamento superficial causado pelas chuvas pode transportar essas partículas para corpos d'água. Adicionalmente, a percolação pode levar o fluoreto para as camadas mais profundas do solo, aumentando o risco de contaminação (Vargas, 2023). A Portaria GM/MS n.º 888, de 4 de maio de 2011, estabelece procedimentos para o controle da qualidade da água destinada ao consumo humano, entretanto o limite de recomendado de fluoretação na água não pode ultrapassar de $1,5 \text{ mg/L}$ e $1,4 \text{ mg/L}$ de acordo com RESOLUÇÃO No 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005 (Brasil, 2011; Brasil 2005).

Estudos reportaram que águas subterrâneas asiáticas apresentam concentrações de fluoreto frequentemente excedendo 10 mg L^{-1} , em regiões áridas. A irrigação com águas contaminadas representa o principal vetor de exposição para culturas agrícolas, com particular

risco para hortaliças de ciclo curto que concentram fluoreto em tecidos foliares durante períodos de crescimento rápido (Yadav *et al.*, 2019).

Os impactos ambientais decorrentes da presença de fluoreto de cálcio no solo, na água e no ar podem comprometer o crescimento e o desenvolvimento das plantas. A exposição das plantas a esse contaminante interfere na absorção de nutrientes, reduzindo o comprimento das raízes. Ademais, se animais herbívoros se alimentarem de plantas contaminadas, isso pode representar um risco para toda a cadeia alimentar (Rodrigues *et al.*, 2017).

2.3 Uso do fluoreto de cálcio em defensivos e adubos agrícolas

O flúor é um elemento químico altamente reativo pertencente ao grupo dos halogênios. Quando esse elemento ganha um elétron, forma o íon fluoreto (F^-), que apresenta elevada estabilidade química e pode interagir com diversos compostos presentes no ambiente (Prystupa, 2011). O fluoreto é considerado potencialmente tóxico, pois possui a capacidade de interferir em diferentes reações bioquímicas e processos metabólicos em organismos vivos (Strunecka; Strunecky, 2020).

A presença de fluoretos em áreas agrícolas pode estar associada, entre outros fatores, à aplicação de fertilizantes minerais. O fluoreto de cálcio pode ocorrer como impureza em fertilizantes produzidos a partir de rochas fosfáticas, utilizadas como matéria-prima na indústria de fertilizantes. Produtos como o fosfato diamônico (DAP), o superfosfato simples (SSP) e nitrofosfato de amônio (ANP) podem conter pequenas quantidades de fluorita em sua composição (Ramteke *et al.*, 2018).

Durante o processo de produção de fertilizantes fosfatados, as impurezas naturalmente presentes nas rochas fosfáticas, incluindo flúor, arsênio e cádmio, podem ser liberadas como subprodutos industriais ou permanecer em concentrações residuais nos fertilizantes finais (Rodrigues *et al.*, 2017). Dessa forma, a aplicação contínua desses insumos no solo pode contribuir para o acúmulo gradual de fluoretos no ambiente agrícola.

Estudos realizados em áreas agrícolas da região de Venâncio Aires e Santa Cruz do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, identificaram a presença de fluoreto em folhas de plantas de tabaco cultivadas em solos tratados com fertilizantes fosfatados, nos quais foram observadas concentrações de até 11 mg L^{-1} de fluoreto associadas ao uso desses insumos (Paula *et al.*, 2006).

Portanto, a presença de compostos contendo fluoreto em fertilizantes agrícolas pode representar uma fonte potencial de contaminação ambiental. Quando liberados no solo e transportados pela água da chuva ou pela irrigação, esses compostos podem contribuir para

alterações na qualidade do solo e da água, podendo afetar organismos vegetais e outros componentes do ecossistema (Ramteke *et al.*, 2018).

2.4 *Lactuca sativa* L. como bioindicador de fitotoxicidade

Para estabelecer limites tolerados para contaminantes em alimentos, visando a qualidade dos alimentos para manter a saúde pública a RDC nº 722/2022 da ANVISA determina sobre os contaminantes químicos que podem estar presentes nos alimentos, esses que alteram o desenvolvimento da planta. Essa preocupação ambiental segue com objetivo de criação de diretrizes capaz de defender e preservar o meio ambiente, A Lei nº 6.938/1981, de 31 de agosto de 1981, institui a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) no Brasil, essa norma aplica em seu art. 4º, inciso IV e V, incentiva ao desenvolvimento de pesquisas e de tecnologias e a divulgação dos dados de pesquisa para conscientização e formação de consciência pública de preservação da qualidade ambiental.

O monitoramento de emissões é necessário para avaliar casos de regiões com material particulado no ar, o fluoreto de cálcio que está presente nas emissões das indústrias é necessário alternativas para monitoramento da qualidade das plantações próximas (USEPA, 2020).

Dessa forma, a elevada sensibilidade de *Lactuca sativa* L. a diferentes contaminantes ambientais, aliada ao seu rápido ciclo de desenvolvimento e à facilidade de cultivo, torna essa espécie uma ferramenta eficiente para a realização de bioensaios voltados à avaliação de fitotoxicidade em solos e recursos hídricos.

De acordo com a norma ISO 18763:2016, *Lactuca sativa* L. são amplamente utilizadas como organismo bioindicador em testes de fitotoxicidade, sendo empregada na avaliação da contaminação ambiental por diferentes substâncias químicas. Esses testes baseiam-se na sensibilidade da espécie durante diferentes fases do desenvolvimento vegetal, especialmente na germinação e no crescimento inicial das plântulas, permitindo avaliar o potencial tóxico de compostos presentes no solo ou na água (ISO, 2016).

Diversos estudos têm utilizado *Lactuca sativa* L. como espécie bioindicadora de fitotoxicidade. Em experimentos utilizando fluoreto de potássio (KF), observou-se que doses mais elevadas desse composto provocaram redução na germinação, diminuição no índice de velocidade de germinação e redução da eficiência fotossintética em plântulas de alface (Rodrigues *et al.*, 2022).

Outros estudos avaliaram os efeitos combinados de flúor (F) e cádmio (Cd) sobre plântulas de alface, verificando inibição do crescimento radicular, redução na absorção de nutrientes e prejuízos à atividade fotossintética das plantas (Wang *et al.*, 2022). Resultados semelhantes também foram observados em experimentos com exposição das plântulas ao

corante Vermelho Direto 09, no qual foram registrados efeitos negativos no desenvolvimento inicial das plantas (Silva *et al.*, 2024).

A característica da alface permite a captura de partículas no ar, devido sua camada epidérmica, os estômatos, as análises da distribuição dos elementos torna as plantas bioindicadoras (Blanusa *et al.*, 2015 ; Ram *et al.*, 2015). A alface, a partir de seus testes de germinação e crescimento se tornaram ferramentas importantes para avaliação bioindicadora (Charles *et al.*, 2011). Alterações nas propriedades morfológicas e bioquímicas da planta, coloração das folhas, observação no atraso de crescimento, aumento das atividades enzimáticas e trabalho de defesa, formação de moléculas instáveis chamadas as espécies reativas de oxigênio (ROS), são reações esperadas quando a planta sofre estresse tóxico, no trabalho de Kolahi *et al.* (2020) abordou na investigação de contaminação de cádmio na alface como possível bioindicadora. Diante desses estudos e normas, a utilização da *Lactuca sativa L.* como uma importante ferramenta bioindicadora, associado as avaliações laboratoriais contribui para avaliação de qualidade ambiental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e locais do experimento

O experimento foi conduzido utilizando sementes comerciais da cultivar de alface crespa ‘Moana’. As análises de germinação, índice de velocidade de germinação foram realizadas no Laboratório de Sementes, no Laboratório de Ecofisiologia Vegetal, aconteceram as análises de fluorescência da clorofila e o projeto de chuva simulada e Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais, realizou-se a caracterização anatômica do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, Brasil (17°48’16’’ S; 50°54’19’’ W; altitude de 753 m).

Para a realização dos testes foram estabelecidos cinco tratamentos com diferentes concentrações de fluoreto de cálcio (CaF₂): 0,0 mg L⁻¹ (controle), 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹, 15,0 mg L⁻¹ e 20,0 mg L⁻¹, preparadas em água destilada.

3.2 Germinação, índice de velocidade de germinação e comprimento de plântula

O teste de germinação foi conduzido em caixas acrílicas de material poliestireno cristal transparente, dimensões: 11 cm x 11 cm x 3,5 cm e capacidade de aproximadamente de 250 ml, contendo duas folhas de papel mata-borrão previamente umedecidas com água destilada, em volume equivalente a 2,5 vezes a massa seca do papel, e umedecidas com as dosagens de fluoreto de cálcio, conforme as recomendações das Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Foram distribuídas 50 sementes por caixa, totalizando quatro repetições por tratamento. As caixas foram mantidas em câmara de germinação do tipo BOD (Biochemical Oxygen Demand), num período de 7 dias, com temperatura controlada de 25 ± 0,5 °C e fotoperíodo de 16/8 h (luz/escuro), condições consideradas adequadas para a germinação de *Lactuca sativa L.* (Nascimento, 2003).

A contagem da germinação foi realizada no sétimo dia após a sementeira, sendo consideradas germinadas apenas as sementes que apresentaram protrusão radicular superior a 2 mm (Labouriau; Valadares, 1976). Os resultados foram expressos em porcentagem.

No período diário de germinação, foram coletados dados do Índice de Velocidade de Germinação (IVG) foi calculado de acordo com a fórmula proposta por Maguire (1962): **IVG = $\Sigma (ni/ti)$**

Onde:

ni = número de sementes germinadas no i-ésimo dia

ti = tempo (dias) após a sementeira

Ao final do período de germinação, foi determinado o comprimento de plântulas normais. Para essa avaliação, as plântulas foram removidas cuidadosamente do substrato e

posicionadas sobre superfície plana, sendo o comprimento total medido com auxílio de régua milimetrada. Os resultados foram expressos em centímetros (Nakagawa, 1999).

3.3 Fluorescência de imagem de plântulas

As imagens e os parâmetros de fluorescência da clorofila foram realizados no Laboratório de Ecofisiologia Vegetal, seguindo a metodologia de Silva *et al.* (2022), foram medidas as variáveis após 7 dias das análises da germinação, usando um fluorômetro de câmara foliar (6400-40, Li-Cor, Nebraska, EUA) e o software Imaging Win (Heiz Walz GmbH, Effeltrich, Alemanha). Para obter imagens (640 x 480 pixels) a uma distância de 18,5 cm de uma câmera de dispositivo de carga acoplada (CCD) a um dispositivo de fluorescência. Dados de análise de Fluorescência da Clorofila de *Lactuca sativa L.*, plântulas após 7 dias de exposição ao Fluoreto de Cálcio (CaF_2) em câmara de crescimento na dose de 0, 5, 10, 15 e 20 mg L^{-1} . Rendimento quântico máximo do fotossistema II (PSII) (F_v/F_m), fluorescência mínima (F_0') rendimento quântico efetivo do PSII (YII), suspensão da dissipação não fotoquímica regulada (YNPQ), rendimento da dissipação de energia Y(NO), taxa de transporte de elétrons (ETR). (Lima et al. 2017).

As primeiras avaliações foram realizadas em plântulas adaptadas à escuridão quando os centros da reação foram totalmente abertos (todos os aceitadores primários oxidados) com perda mínima de calor. Sob essa condição, os tecidos foliares foram expostos a uma luz fraca ($0,03 \mu \text{mol, m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) para determinar a fluorescência escura (F_0). Em seguida, um pulso de luz saturante ($>6000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foi aplicado por 0,8s para determinar a fluorescência máxima (F_m).

A partir dessas medidas iniciais, foi calculado o rendimento quântico máximo de PSII, $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$. Os tecidos foliares foram expostos a luz actínica para obter a fluorescência (F). Posteriormente, um pulso de saturação foi aplicado para obter a máxima fluorescência (F_m'). O rendimento quântico efetivo do PSII, $Y(II) = (F_m' - F) / F_m'$, foi calculado de acordo com (Genty, Briantais & Baker, 1989). O Y (II) foi utilizado para calcular a taxa aparente de fotossíntese, $\text{ETR} = Y(II) \times \text{PAR} \times \text{LeafABS} \times 0,5$ (Bilger, Schreiber & Bock, 1995) onde PAR é o fluxo de fótons ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) nas folhas, LeafABS é a fração da luz incidente que é absorvida pelas folhas e 0,5 é a fração de energia de excitação direcionada ao PSII (Laisk e Loreto, 1996).

3.4 Projeto de chuva simulada e sintomas visíveis

O experimento foi conduzido em um segundo cenário no Laboratório de Ecofisiologia Vegetal do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, na casa de vegetação, sob

temperatura controlada de $27 \pm 0,5$ °C durante o dia e $24 \pm 0,5$ °C durante a noite, e umidade relativa média de aproximadamente $63 \pm 5\%$.

Foram semeadas duas sementes de alface por vaso contendo substrato comercial Bioplant Plus® (Bioplant, Nova Ponte, Brasil). Após a emergência, as mudas com desenvolvimento uniforme foram submetidas à aplicação de soluções contendo fluoreto de cálcio (CaF_2) nas concentrações de $0,0 \text{ mg L}^{-1}$ (controle), 5 mg L^{-1} , 10 mg L^{-1} , 15 mg L^{-1} e 20 mg L^{-1} durante 40 dias.

A aplicação das soluções foi realizada por meio de aspersão manual, simulando eventos de chuva, com volume diário de 60 ml aplicado à parte aérea das plantas, conforme metodologia adaptada de Rodrigues *et al.* (2017). A irrigação do substrato foi mantida de forma a preservar aproximadamente 65% da capacidade de retenção de água do vaso.



Figura 1 - Passo a passo da metodologia do projeto de chuva simulada. Elaborado com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT/DALL·E, 2026).

Ao final do período experimental, foram registradas por meio da câmera Grande-angular: abertura $f/1.6$ para análise de sintomas visíveis das plantas, incluindo alterações na coloração das folhas, textura, crescimento e ocorrência de necrose.

3.5 Caracterização anatômica

Para a caracterização anatômica foram avaliadas duas plântulas por repetição após 40 dias de exposição às soluções contendo fluoreto de cálcio. Folhas completamente expandidas foram coletadas e fixadas em solução de Karnovsky por 24 horas (Karnovsky, 1965). Após esse período, o material vegetal foi pré-lavado em tampão fosfato, desidratado em série etílica de concentração crescente e incluído em historresina (Leica, Alemanha), conforme recomendações do fabricante, realizados no Laboratório de Sementes.

No Laboratório de Cultura de Tecidos as amostras foram seccionadas transversalmente com espessura de 5 μm utilizando navalhas de aço em micrótomo rotativo (modelo 1508R, Logen Científico, China). As seções foram coradas com azul de toluidina (0,05% em tampão fosfato 0,1 M, pH 6,8), conforme metodologia descrita por O'Brien, Feder e McCully (1964).

3.6 Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por cinco tratamentos e quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Dunnett ao nível de 5% de probabilidade.

Os dados de potencial fisiológico das sementes e os parâmetros fisiológicos foram submetidos à análise de componentes principais (PCA) e à correlação de Pearson (r). As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R versão 3.6.0, enquanto os gráficos foram elaborados no programa SigmaPlot 14.5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Germinação, IVG e comprimento de plântula

A análise de variância indicou que as concentrações de fluoreto de cálcio (CaF_2) influenciaram alguns dos parâmetros avaliados durante o processo germinativo de *Lactuca sativa L.* (Figura 1).

Em relação à porcentagem de germinação, observou-se que as sementes submetidas às concentrações de 5 e 10 mg L^{-1} apresentaram desempenho semelhante ou ligeiramente superior ao controle. Entretanto, nas maiores concentrações (15 e 20 mg L^{-1}), verificou-se redução no número de sementes germinadas em comparação com o controle, indicando possível efeito fitotóxico do fluoreto em doses mais elevadas (Figura 1).

Dados encontrados na literatura mostrou comportamentos semelhantes onde o uso de fluoreto de potássio em concentrações maiores reduziu a taxa de germinação, neste estudo doses mais altas foram 20 e 30 mg L^{-1} de KF, reduzindo assim a germinação das plantas resultado semelhante aos dados apresentados pelas doses a partir de 15 mg L^{-1} , a presença do flúor é capaz de impedir funcionamentos do metabolismo celular durante a produção de ATP, respiração celular, absorção de água e nutrientes observado por Rodrigues *et al.* (2022).

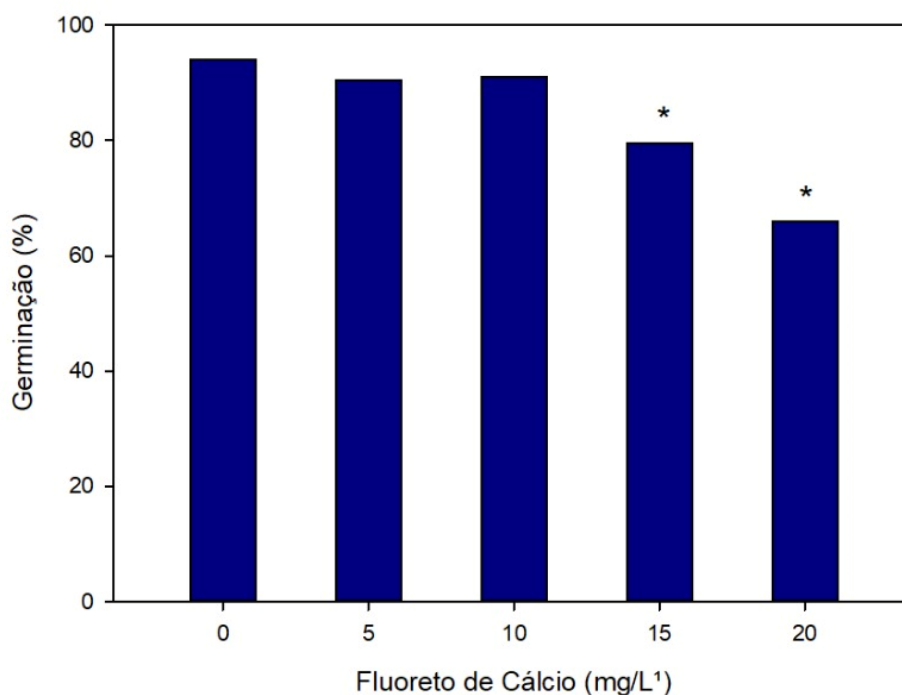


Figura 2 - Efeito do fluoreto de cálcio (CaF_2) na germinação de sementes de alface para o controle, e condicionamento com as concentrações de 0,0; 5,0; 10; 15 e 20 mg L^{-1} . Colunas verticais representam a média de cinco repetições com barras indicando o erro padrão. Os asteriscos indicam diferenças a 5% (*) e 1% (*) de probabilidade.

O índice de velocidade de germinação (IVG) também apresentou tendência de redução com o aumento das concentrações de CaF_2 (Figura 2), sugerindo interferência do contaminante nos processos fisiológicos iniciais da germinação e no vigor das sementes.

Esses resultados sugerem que concentrações mais elevadas de fluoreto de cálcio podem afetar negativamente o estabelecimento inicial das plantas, interferindo no vigor das sementes e no desenvolvimento inicial das plântulas. Resultados semelhantes foram relatados por Rodrigues *et al.* (2022), que observaram redução na germinação e no vigor de sementes expostas a fluoreto de potássio.

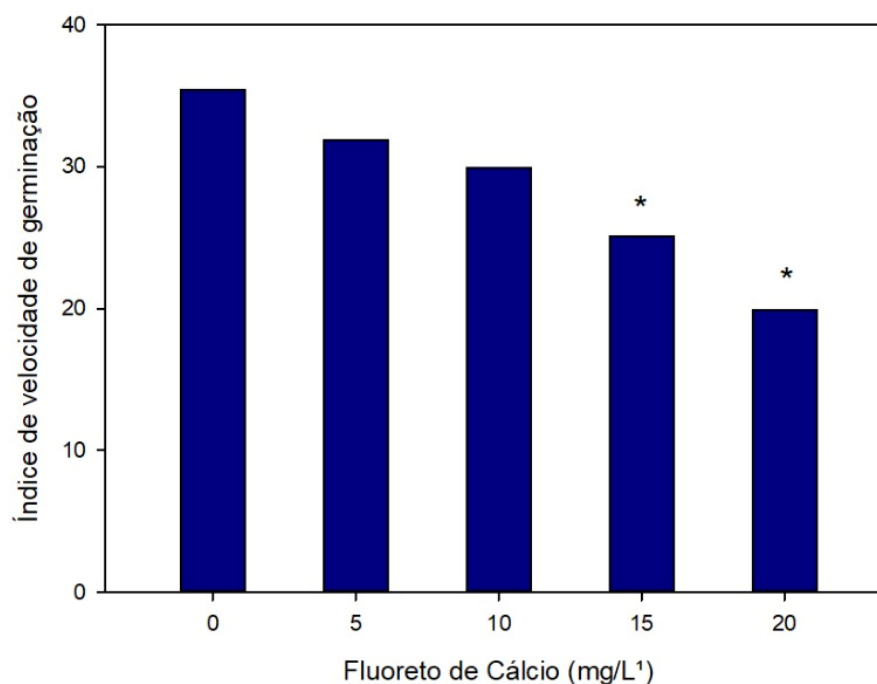


Figura 3 - Efeito do fluoreto de cálcio (CaF_2) no índice de velocidade de germinação de sementes de alface para o controle, e condicionamento com as concentrações de 0,0; 5,0; 10; 15 e 20 mg L⁻¹. Colunas verticais representam a média de cinco repetições com barras indicando o erro padrão. Os asteriscos indicam diferenças a 5% (*) e 1% (*) de probabilidade.

Estudos com tema semelhante em relação aos efeitos do flúor no crescimento inicial da leguminosa *Prosopis Juliflora* (Mimosoideae) árvore de ciclo rápido, foram analisadas na germinação, crescimento de raiz e índice de vigor, de acordo com o aumento de doses do NaF os resultados foram diminuindo (SAINI *et al.*, 2013).

Da mesma forma o comprimento de plântula, as doses a partir de 15 mg L⁻¹ tiveram diferença estatística de acordo com os testes de Dunnett apresentado pela tabela 1, em outras pesquisas indicam efeito em doses a partir de 30 mg L⁻¹ fluoreto de potássio em espécie de *P. vulgaris* (Lima E Silva *et al.*, 2022).

Tabela 1 - Comprimento de plântulas de acordo com o teste de Dunnett a nível 5% de variância.

Tratamentos	Médias
0	4,825
5	4,975 ± 0,15
10	4,375 ± 0,45
15	3,325 *± 1,5
20	3,35 * ± 1,325
Análise de variância (ANOVA)	
Valor de D	0,756

Os dados representam a média ± erro padrão da média ($n = 5$).

Os asteriscos indicam diferenças significativas a 5% (*) de probabilidade, entre os tratamentos CaF₂ e controle, de acordo com o teste de Dunnett.

Nas pesquisas de Pelc et al, (2020) utilizando fluoreto de sódio nas cultivares de trigo também foram notadas diferenças estatisticamente significativas nos resultados de comprimento de planta e de acordo com o aumento de doses o crescimento era afetado.

4.2 Fluorescência de clorofila

Os parâmetros de fluorescência da clorofila Fv/Fm, Fo', Y(II), Y(NPQ), Y(NO) e ETR não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos avaliados. Esses resultados indicam que a exposição ao fluoreto de cálcio (CaF₂) não comprometeu o funcionamento do aparato fotossintético em *Lactuca sativa L.*

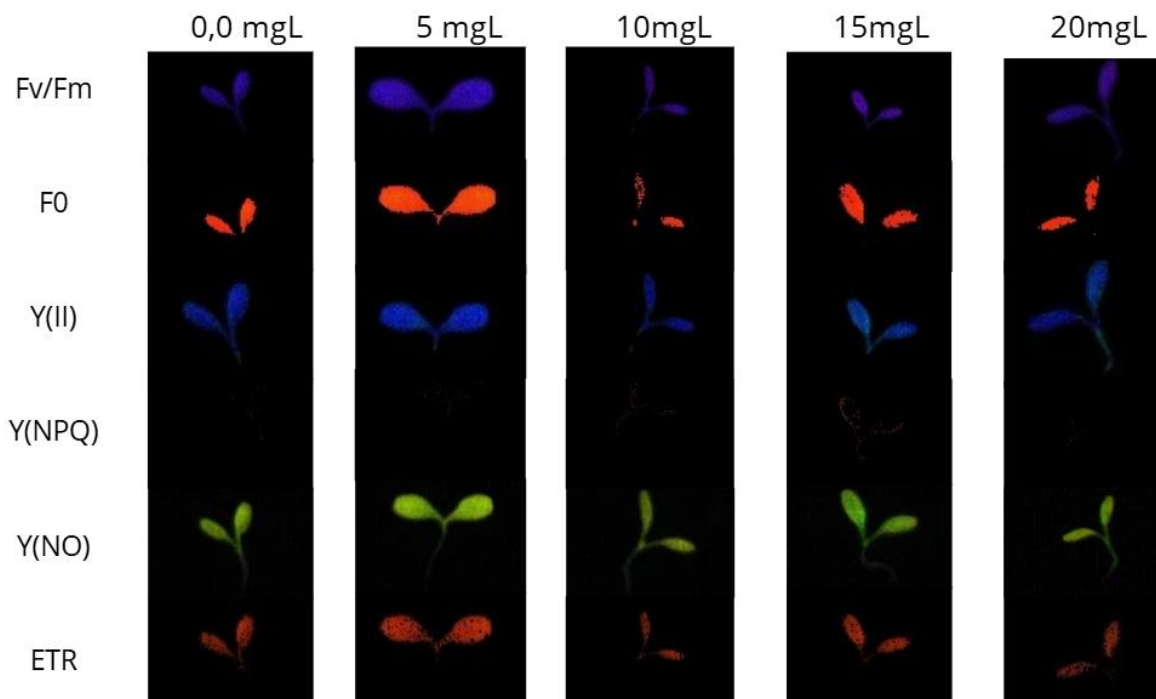


Figura 4 - Dados de análise de Fluorescência da Clorofila de *Lactuca sativa L.*, plântulas após 7 dias de exposição ao Fluoreto de Cálcio (CaF₂) em câmara de crescimento na dose de 0 mg L⁻¹, 5 mg L⁻¹, 10 mg L⁻¹, 15 mg L⁻¹ e 20 mg L⁻¹. Rendimento quântico máximo do fotossistema II (PSII) (Fv/Fm), Florescência mínima (Fo'1) rendimento quântico efetivo do PSII(YII), suspensão da dissipação não fotoquímica regulada (YNPQ), rendimento da dissipação de energia Y(NO), taxa de transporte de elétrons (ETR).

A fluorescência da clorofila é amplamente utilizada como indicador da eficiência do fotossistema II e de possíveis alterações no metabolismo fotossintético das plantas sob condições de estresse. Em situações de estresse ambiental, é comum observar redução da eficiência fotossintética e alterações nos mecanismos de dissipação de energia (Jovanić *et al.*, 2022).

Entende-se que o aumento da fluorescência é uma maneira de fornecer informações de resposta da planta ao estresse, a função do Y(NPQ) é absorver a luz, dissipar calor e quando a fotossíntese não pode ser realizada devido ao estresse o Y(NPQ) irá dissipar maior quantidade de calor (Sánchez-Moreiras *et al.*, 2020), indicativos como ETR, Y(II), Y(NPQ), são capazes de canalizar para a cadeia de transporte de elétrons e o nível de fotoquímica enfrentando o estresse sem que a planta se prejudique (Araniti *et al.*, 2018). Quando a planta é danificada pelo fluoreto, é esperado que a energia luminosa quando presente na folha, varie os níveis de pH presentes no cloroplasto, causando danos às membranas celulares reduzindo os pigmentos, como a xantofila, diminuindo a eficiência fotoquímica (Ghassemi-Golezani & Farhangi-Abriz, 2019). As membranas celulares dos cloroplastos e mitocôndrias, que quando em contato com o poluente o fluxo de elétrons é liberado espécies reativas de oxigênio que quando em excesso,

danifica os fosfolipídios da membrana causando danos às organelas celulares (KUMAR et al., 2024; EL-MOGY et al., 2026).

No entanto, os resultados obtidos neste estudo indicam que as concentrações de CaF_2 avaliadas não foram suficientes para provocar alterações significativas nos parâmetros fotossintéticos, sugerindo que o aparato fotossintético da espécie apresentou tolerância às condições experimentais analisadas. Em um estudo utilizando fluoreto em plantas de azevém, café e citros, não tiveram os parâmetros F_v/F_m alterados, que indicou que o sistema fotoquímico não foi afetado nessas plantas (Mesquita, 2010).

Resultados semelhantes foram relatados por Silva *et al.* (2022), que observaram a atuação de mecanismos de dissipação de energia como forma de proteção do sistema fotossintético em plantas submetidas a diferentes condições de estresse, na espécie *Phaseolus vulgaris L.* expostas ao fluoreto de potássio.

4.3 Projeto de chuva simulada e sintomas visíveis

O monitoramento do crescimento das plantas foi realizado no Laboratório de Ecofisiologia Vegetal a partir da germinação das sementes de *Lactuca sativa L.* Durante os primeiros dias de desenvolvimento, as plantas foram irrigadas apenas com água potável fornecida pela instituição, apresentando crescimento relativamente uniforme.

Após o período inicial de estabelecimento, as irrigações passaram a ser realizadas por meio de simulação de chuva contendo diferentes concentrações de fluoreto de cálcio (CaF_2). Esse processo permitiu reproduzir a exposição de fluoretos na atmosfera e contaminação nas plantas.



Figura 4 - Avaliação morfológica de plantas de *Lactuca sativa* L. após exposição ao fluoreto de cálcio (CaF₂) por meio de simulação de chuva durante 40 dias em casa de vegetação.

Observa-se um gradiente de sintomas de fitotoxicidade conforme o aumento da concentração do composto. O tratamento controle (T0 – 0 mg L⁻¹) e o tratamento T1 (5 mg L⁻¹) apresentaram plantas com desenvolvimento normal e folhas saudáveis. No tratamento T2 (10 mg L⁻¹) observa-se início de clorose foliar. No tratamento T3 (15 mg L⁻¹) verifica-se redução no crescimento e menor desenvolvimento das plantas. Já no tratamento T4 (20 mg L⁻¹) observa-se necrose foliar acentuada e comprometimento severo do desenvolvimento vegetal.

Como apresentados na Figura 4, estudos semelhantes apontam sobre as plantas submetidas às concentrações mais elevadas apresentaram coloração foliar mais clara,

principalmente nas doses superiores a 10 mg L^{-1} , além de redução no desenvolvimento vegetativo quando comparadas ao tratamento controle. Também foram observados sintomas visuais compatíveis com estresse fisiológico, como clorose e presença de áreas necróticas nas folhas, sintomas frequentemente associados à toxicidade por fluoretos em plantas (Rodrigues *et al.*, 2017; Gadi *et al.*, 2021).

Pesquisas que avaliaram os efeitos do fluoreto em plantas de citros e café, onde não tiveram resultados significativos de F_v/F_m , porém visualmente encontram resposta de necrose da planta devido a fertirrigação do contaminante fluoreto de cálcio (Mesquita, 2010).

De maneira geral, os resultados indicam que a exposição a concentrações superiores a 10 mg L^{-1} de CaF_2 pode provocar sintomas de fitotoxicidade, comprometendo o desenvolvimento das plantas e reduzindo seu potencial de crescimento, reforçando o potencial da *Lactuca sativa L.* como bioindicadora.

4.4 Análises anatômicas

A análise anatômica das folhas de *Lactuca sativa L.* expostas a diferentes concentrações de fluoreto de cálcio (CaF_2) revelou alterações estruturais nos tecidos foliares quando comparadas ao tratamento controle (Figura 5).

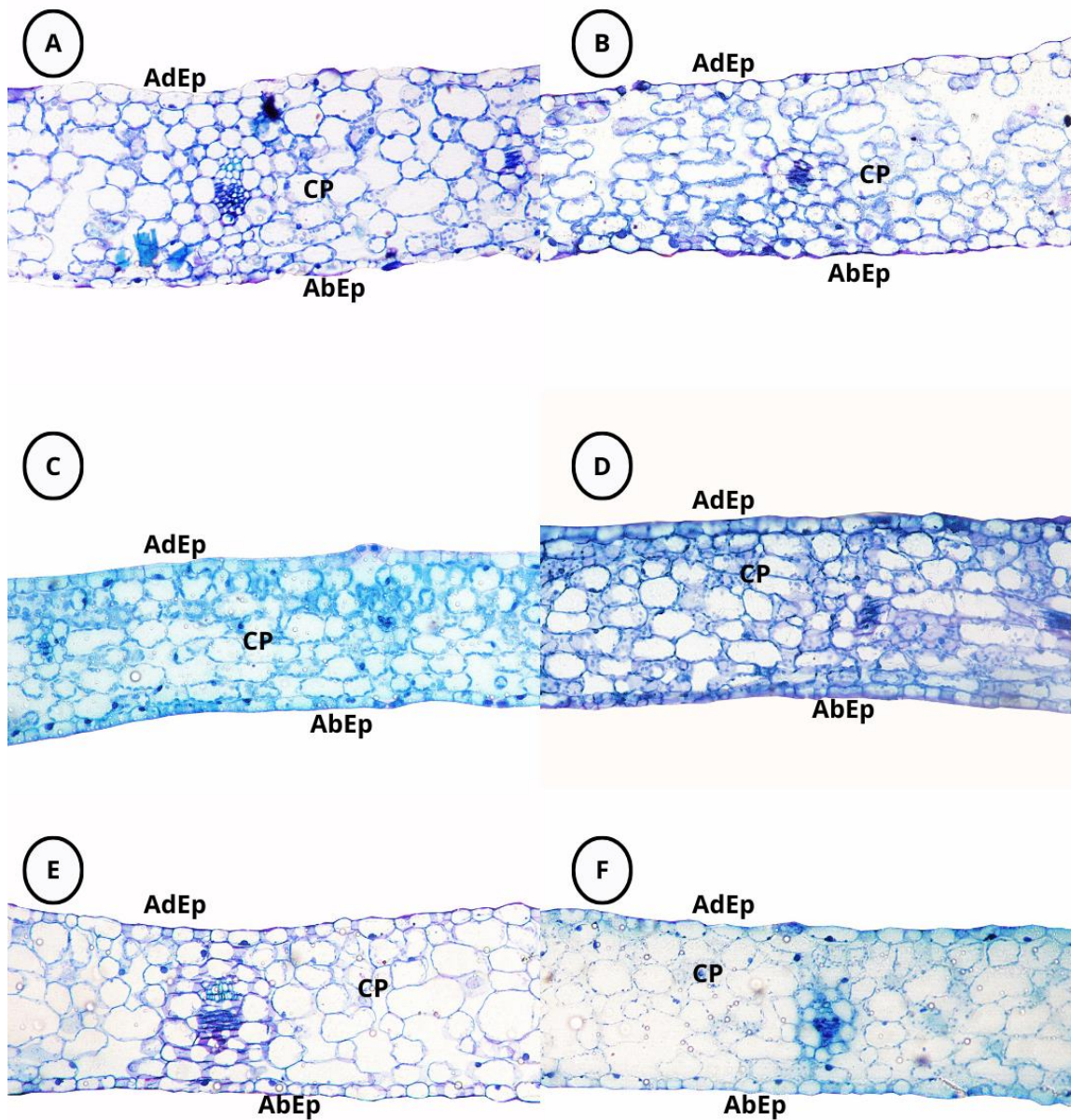


Figura 5 - Anatomia da folha de plantas de *Lactuca Sativa L.* Após 40 dias em exposição a diferentes doses de fluoreto de cálcio. (A) controle 0 mg L⁻¹, (B) 5 mg L⁻¹, (C) 10 mg L⁻¹, (D) 15 mg L⁻¹, (E e F) 20 mg L⁻¹. (EpAd) epiderme adaxial; (EpAb) epiderme abaxial; (CP) parênquima clorofilado. Barra de escala = 200 μm.

Nas plantas do tratamento controle (0 mg L⁻¹), observou-se organização tecidual típica da espécie, com sistema vascular bem definido e células do mesófilo organizadas. Nos tratamentos submetidos às maiores concentrações de CaF₂ foram observadas achatamento na estrutura do mesofilo.

Conforme apresentado na Figura 5, o aumento das concentrações de CaF_2 resultou em desorganização dos tecidos, com alterações na espessura do mesófilo e possíveis modificações na estrutura vascular. Essas alterações foram mais evidentes nos tratamentos de 15 e 20 mg L^{-1} . Esses resultados sugerem que a exposição ao fluoreto de cálcio pode afetar a organização estrutural dos tecidos foliares, o que pode estar relacionado aos sintomas visuais de estresse observados nas análises morfológicas.

Estudos anteriores relatam que a exposição a fluoretos pode provocar alterações anatômicas em tecidos vegetais (Sant'anna-Santos *et al.*, 2021), em outros trabalhos como o de Rodrigues *et al.*, (2017), onde as células apresentaram formato regular e sem alterações.

4.5 Análise de componentes principais (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) (Figura 6) permitiu avaliar as relações entre as variáveis analisadas e as concentrações de fluoreto de cálcio (CaF_2). Os dois primeiros componentes principais explicaram conjuntamente 63,0% da variância total dos dados, sendo o primeiro componente (Dim1) responsável por 35,8% e o segundo componente (Dim2) por 27,2% da variabilidade observada.

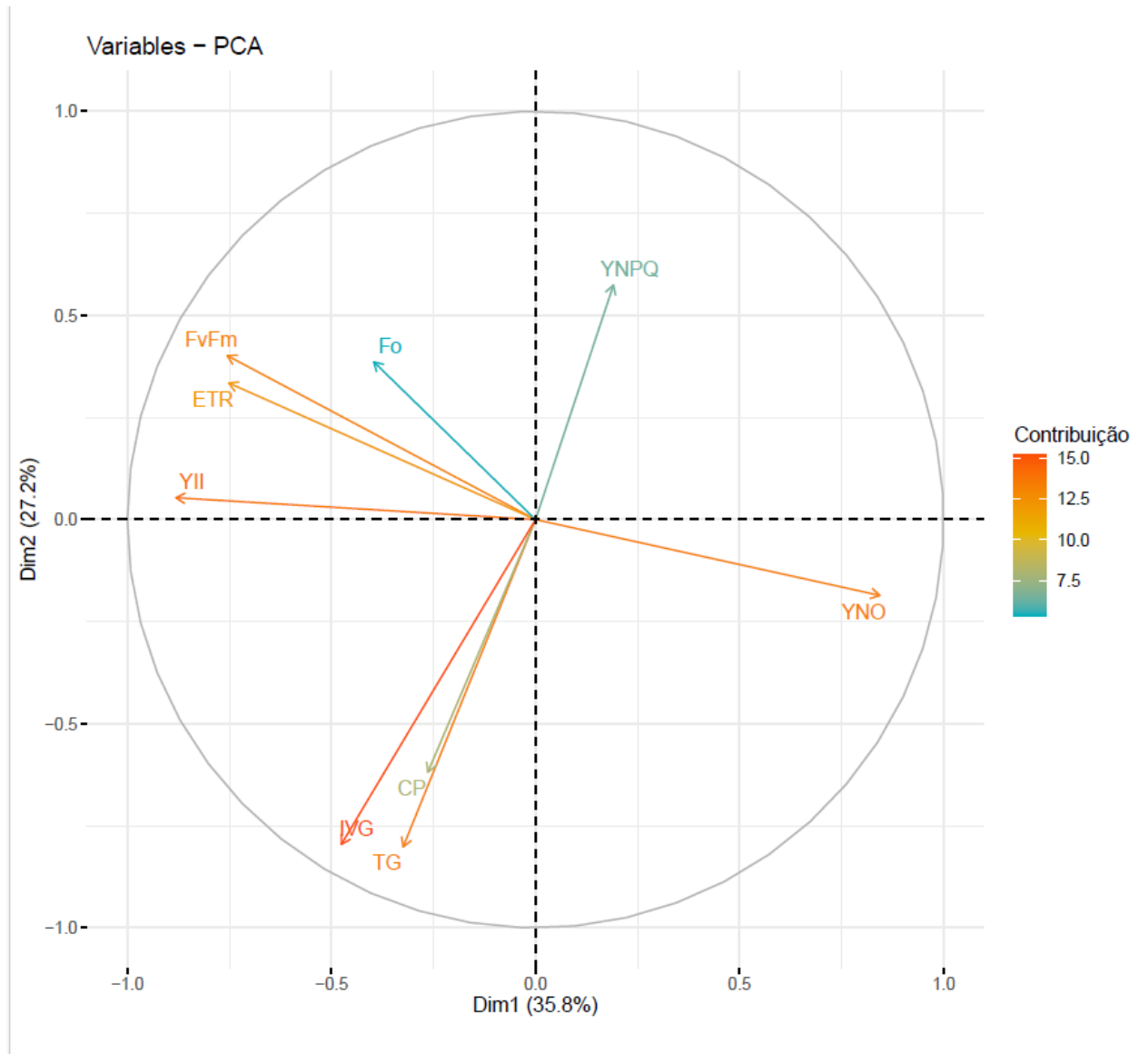


Figura 5 -Análise dos componentes principais (PCA) de dados de qualidade e vigor de sementes, PG (porcentagem de germinação), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento de plântula (CP), dados de fluorescência de imagem, rendimento quântico potencial do PSII (Fv/Fm), fluorescência inicial (F0), rendimento quântico efetivo do Y(II), rendimento quântico de dissipação de energia não regulamentada do PSII Y(NO), rendimento de extinção não fotoquímica (YNPQ) e taxa de transporte de eletros (ETR).

A direção e o comprimento dos vetores indicam a contribuição e a correlação entre as variáveis. Vetores orientados na mesma direção indicam correlação positiva entre as variáveis, enquanto vetores em direções opostas indicam correlação negativa.

Observa-se que as variáveis, teste de germinação (TG) e índice de velocidade de germinação (IVG) apresentam vetores próximos e orientados na mesma direção, indicando forte correlação positiva entre essas variáveis, de forma semelhante, o comprimento de plântula (CP) também apresenta associação com essas variáveis, sugerindo relação positiva entre os

parâmetros de crescimento inicial. Reforçando as análises que foram estatisticamente significativas com redução de desenvolvimento ao aumento de doses do fluoreto de cálcio.

Por outro lado, a variável $Y(NPQ)$ apresenta direção oposta em relação às variáveis relacionadas à germinação, indicando correlação negativa. Já os parâmetros de fluorescência da clorofila, como F_v/F_m , ETR e $Y(II)$, apresentam associação principalmente com o eixo Dim1, sugerindo maior contribuição dessas variáveis para a variabilidade explicada por esse componente. Com a correlação negativa aos dados de TG, IVG e CP, pois não apresentaram diferença significativa.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que o aumento das concentrações de fluoreto de cálcio (CaF_2) pode interferir no desenvolvimento de *Lactuca sativa L.*, afetando parâmetros fisiológicos relacionados à germinação e ao vigor e anatômico das plântulas. Além disso, alterações na organização dos tecidos foliares foram observadas nas maiores doses avaliadas.

Esses achados sugerem que a presença de doses a partir de 15mgL^{-1} do CaF_2 no ambiente pode comprometer o desenvolvimento da cultura. E a *Lactuca sativa L.* através de análises laboratoriais e estudos comprova ser uma ferramenta bioindicadora eficiente e de baixo custo.

REFERÊNCIAS

ABIYE, T.; BYBEE, G.; LESHOMO, J. **Fluoride concentrations in the arid Namaqualand and the Waterberg groundwater, South Africa: understanding the controls of mobilization through hydrogeochemical and environmental isotopic approaches.** *Groundwater for Sustainable Development*, v. 5, p. 1–9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.12.004>. Acesso em: 22 nov. 2025.

Agência de Notícias do Governo do Estado de São Paulo. **São Paulo é líder na produção nacional de alface.** 6 jan. 2026. Disponível em: <https://www.agenciasp.sp.gov.br/sao-paulo-e-lider-na-producao-nacional-de-alface/>. Acesso em: 9 maio 2026.

ALMEIDA RODRIGUES, A.; ALMEIDA RODRIGUES, D.; SALES, J. F.; CARVALHO VASCONCELOS FILHO, S.; COSTA, A. C.; LINO RODRIGUES, C.; ALVES DA SILVA, A.; DOMINGOS, M.; MÜLLER, C. **Morphoanatomical, physiological, and biochemical indicators in *Lactuca sativa* L. germination and growth in response to fluoride.** *Plants*, Basel, v. 11, n. 23, p. 3406, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11233406>. Acesso em: 16 mar. 2026.

ALTUNKAYA, Arzu; BECKER, Eleonora Miquel; GÖKMEN, Vural; SKIBSTED, Leif H. **Antioxidant activity of lettuce extract (*Lactuca sativa* L.) and synergism with added phenolic antioxidants.** *Food Chemistry*, Amsterdam, v. 115, n. 1, p. 163–168, 2009. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.11.082. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814608014313>. Acesso em: 11 fev. 2026.

Araniti F, Lupini A, Sunseri F, Abenavoli MR (2017) **Potencial alelopático de *Dittrichia viscosa* (L.) W. Greuter mediado por COVs: uma abordagem fisiológica e metabolômica.** *PLoS ONE* 12(1): e0170161. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170161>. Acesso em: 10 abr. 2026.

Araújo, Marcos Pereira de; El-Deir, Soraya Giovanetti; Tavares, Rosângela Gomes. ***Lactuca sativa* como bioindicador da contaminação por alumínio do lodo de Estação de Tratamento de Água.** *Sistemas & Gestão*, v. 16, n. 2, 2022. DOI: <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2021.v16n2.1717>. Acesso em: 4 maio 2026.

BILGER, W.; SCHREIBER, U.; BOCK, M. **Determinação da eficiência quântica do fotossistema II e do quenching não fotoquímico da fluorescência da clorofila em campo.** *Oecologia*, v. 102, p. 425–432, 1995.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 722, de 1º de julho de 2022.** Dispõe sobre os limites máximos tolerados de contaminantes em alimentos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 6 jul. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-722-de-1-de-julho-de-2022-413235009>. Acesso em: 15 maio 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 53, p. 58–63, 18 mar. 2005. Acesso em: 11 abr. 2026.

BRASIL. Lei nº 6.050, de 24 de maio de 1974. **Dispõe sobre a fluoretação da água em sistemas de abastecimento quando existir estação de tratamento.** Diário Oficial da União: Brasília, DF, 27 maio 1974. Acesso em: 15 maio. 2026.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.** Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2 set. 1981. Acesso em: 15 maio. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Regras para análise de sementes.** Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/arquivos-publicacoes-insumos/2946_regras_analise__sementes.pdf. Acesso em: 23 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 635, de 26 de dezembro de 1975. **Aprova normas e padrões sobre a fluoretação da água destinada ao consumo humano.** Diário Oficial da União: Brasília, DF, 30 jan. 1976. Acesso em: 15 maio. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2011. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acesso em: 22 nov. 2025.

CHAGAS, Jhon Kenedy Moura. **Efeito temporal do biochar de lodo de esgoto nos indicadores de fertilidade e ambientais do solo.** 2021. 121 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2021. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/51781>. Acesso em: 23 nov. 2025.

CHAHINE, S.; MELITO, S.; GIANNINI, V.; SEDDAIU, G.; ROGGERO, P. P. **Fluoride-induced stress alters seed germination and seedling growth in African cowpea landraces.** *Plant Growth Regulation*, v. 100, p. 245–256, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00987-4>. Acesso em: 22 nov. 2025.

CHAHINE, Sara; MELITO, Sara; GIANNINI, Vittoria; SEDDAIU, Giovanna; ROGGERO, Pier Paolo. **O estresse por flúor afeta a germinação de sementes e o crescimento de plântulas, alterando a morfofisiologia de uma variedade local africana de feijão.** *Plant Growth Regulation*, v. 102, p. 339–350, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10725-023-01064-3>. Acesso em: 4 nov. 2025.

Charles, Jérémie; Sancey, Bertrand; Morin-crini, Nadia; Badot, Pierre-marie; Degiorgi, François; Trunfio, Giuseppe; Crini, Grégorio. **Evaluation of the phytotoxicity of polycontaminated industrial effluents using the lettuce plant (*Lactuca sativa*) as a bioindicator.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 74, n. 7, p. 2057-2064, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.07.025>. Acesso em: 8 maio 2026.

CHAVES, A. L. F.; BARBOSA, M. R. V.; AZEVEDO, A. A.; SANT'ANNA-SANTOS, B. F.; SANTOS, M. G. **Ação do flúor dissolvido em chuva simulada sobre a estrutura foliar de *Panicum maximum* Jacq. (colonião) e *Chloris gayana* Kunth. (capim-Rodes)—Poaceae.** Acta Botanica Brasilica, v. 16, n. 4, p. 395–406, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abb/a/4m6nLJkQ7YkC8c5nZx3tH9x/?lang=pt>. Acesso em: 23 nov. 2025.

Chaves, Alf; Silva, Eam; Azevedo, Aa; Cano, Mao; Matsuoka, K. **Ação do flúor distribuída em chuva simulada sobre a estrutura foliar de *Panicum maximum* Jacq. (Colonião) e *Chloris gayana* Kunth. (Capim Rhodes) poáceas.** Acta Botanica Brasilica, v. 16, p. 395-406, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062002000400003>. Acesso em: 6 maio 2026.

CHATGPT. Infográfico experimental sobre cultivo de alface submetida a doses de fluoreto de cálcio. Gerado por inteligência artificial DALL·E/OpenAI, 2026. Imagem digital.

DA SILVA LOBATO, Higor José de Macêdo; SANTOS, Paulo Roberto; RODRIGUES, André Luiz; OLIVEIRA NETO, Carlos Francisco de; GUIMARÃES, Maria Aparecida; COSTA, Ricardo Clécio; LOBATO, Adilson Kato. **Flúor: elemento potencialmente tóxico para plantas, animais e seres humanos.** Revista EDUCamazônia – Educação, Sociedade e Meio Ambiente, v. 10, n. 1, p. 78–92, 2013. Disponível em: <https://educamazonia.ifam.edu.br/view.php?source=1&id=103>. Acesso em: 23 nov. 2025.

DIXIT, S.; SIVALINGAM, P. N.; BASKARAN, R. K. M.; SENTHIL-KUMAR, M.; GHOSH, P. K. **Plant responses to concurrent abiotic and biotic stress: unravelling physiological and morphological mechanisms.** Plant Physiology Reports, v. 29, p. 6–17, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40502-023-00727-6>. Acesso em: 23 nov. 2025.

EL-MOGY, Mohamed M.; IBRAHIM, Amira A.; HUSSEIN, Sameh A.; EL-BELTAGI, Hossam S.; ISMAIL, Ahmed M.; ABDEL-HALEEM, Mohamed. **Molecular crosstalk between plant defense hormones and reactive oxygen species during fungal infection: insights into integrated resistance mechanisms.** Physiological and Molecular Plant Pathology, v. 142, p. 103077, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.103077>. Acesso em: 11 abr. 2026.

FILGUEIRA, Fernando Antonio Reis. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças.** 3. ed. rev. e ampl. Viçosa: UFV, 2013. 421 p. Disponível em: [https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=995452&biblioteca=vazio&busca=\(autoria:%22FILGUEIRA,%20F.%20A.%20R.%22\)&qFacets=\(autoria:%22FILGUEIRA,%20F.%20A.%20R.%22\)&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1](https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=995452&biblioteca=vazio&busca=(autoria:%22FILGUEIRA,%20F.%20A.%20R.%22)&qFacets=(autoria:%22FILGUEIRA,%20F.%20A.%20R.%22)&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1). Acesso em: 22 nov. 2025.

FLUORITA – CaF₂. Porto Alegre: UFRGS, 2021. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/minmicro/Fluorita.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2025.

Fortes, Caio; Duarte, Aildson Pereira; Matsuoka, Sizuo; Hoffman, Hermann P.; Lavorenti, Norberto Antônio. **Toxicidade de flúor em cultivares de milho em área próxima a uma**

indústria cerâmica, Araras (SP). *Bragantia*, v. 62, p. 275-281, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000200013>. Acesso em: 6 maio 2026.

Freshdi. **The Green Revolution: Lettuce's Journey from Ancient Egypt to Modern Hydroponics.** FreshDI, 2025. Disponível em: <https://freshdi.com/blog/The-Green-Revolution-Lettuce8217s-Journey-from-Ancient-Egypt-to-Modern-Hydroponics>. Acesso em: 9 maio 2026.

FUGE, Ron. **Fluorine in the environment, a review of its sources and geochemistry.** *Applied Geochemistry*, v. 100, p. 393-406, 2019. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2018.12.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.12.016>. Acesso em: 14 maio 2026.

GADI, B. R.; KUMAR, R.; GOSWAMI, B.; RANKAWAT, R.; RAO, S. R. **Recent developments in understanding fluoride accumulation, toxicity, and tolerance mechanisms in plants: an overview.** *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, p. 209–228, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00347-1>. Acesso em: 23 nov. 2025.

GARBELOINI, Larissa; MARTINS, Lucelene; BOGGIANI, Paulo César; PINTO, Philippe Luiz Lima Moreira; MARTINEZ, Sara Melissa Gonzalez. **Fluorita.** Universidade de São Paulo, 2024. Disponível em: <http://didatico.igc.usp.br/minerais/haloides/fluorita/>. Acesso em: 11 abr. 2026.

GARRIDO, O. A. **Cultivo e comercialização de hortaliças folhosas em canteiros a céu aberto, no sítio São Joaquim na comunidade de Novo Oriente em Benjamin Constant-AM.** 2023. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Agroecologia) – Centro de Estudos Superiores de Tabatinga, Universidade do Estado do Amazonas, Benjamin Constant, 2023. Disponível em: <https://www.uea.edu.br/portal/noticias.php?cod=noticia23058>. Acesso em: 23 nov. 2025.

Genty B , Briantais JM , Baker NR . 1989. **A relação entre o rendimento quântico do transporte de elétrons fotossintéticos e o quenching da fluorescência da clorofila** .*Biochimica et Biophysica Acta* 990 :87-92. Acesso em: 23 nov. 2025.

GHASSEMI-GOLEZANI, K.; FARHANGI-ABRIZ, S. **Biochar alleviates fluoride toxicity and oxidative stress in safflower (*Carthamus tinctorius L.*) seedlings.** *Chemosphere*, v. 223, p. 406–415, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.087>. Acesso em: 13 abr. 2026.

GOMES, T. F.; LIMA, A. M.; MARQUES, A.; DA SILVA, L. C. **Effects of fluoride emission on the morphoanatomy of three plant species endemics to Brazil using passive biomonitoring.** *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 1–12, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12969-4>. Acesso em: 23 nov. 2025.

HANLEY, J. J.; KOGA, K. T. **Halogênios em sistemas geoquímicos terrestres e cósmicos: abundâncias, comportamentos geoquímicos e métodos analíticos.** In: HARLOV, D.; ARANOVICH, L. (org.). *O papel dos halogênios em processos geoquímicos terrestres e extraterrestres.* Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-61667-4_2. Acesso em: 14 maio 2026.

HAYES, Timothy S.; MILLER, M. Michael; ORRIS, Greta J.; PIATAK, Nadine M. **Fluorine**. In: SCHULZ, Klaus J.; DEYOUNG JR., Robert R.; SEAL II, Robert R.; BRADLEY, Dwight C. (ed.). *Critical mineral resources of the United States: economic and environmental geology and prospects for future supply*. Reston: U.S. Geological Survey, 2017. cap. G, p. G1–G80. (Professional Paper, 1802). Disponível em: 10.3133/pp1802G. Acesso em: 15 maio 2026

HENZ, G.; SUINAGA, F. A. **Tipos de alface cultivados no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2009. (Comunicado Técnico, 75). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/783588/1/cot75.pdf>. Acesso em: 2 out. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 18763:2016 – Qualidade do solo — Determinação dos efeitos tóxicos dos poluentes sobre a germinação e os primeiros estádios de crescimento dos vegetais superiores*. Genebra: ISO, 2016. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/a7308480-a60e-46ba-a92e-e15f1e85d9c8/iso-18763-2016>. Acesso em: 30 out. 2025.

Izquierdo-díaz, Miguel; Hansen, Veronika; Barrio-parra, Fernando; De Miguel, Eduardo; You, Yawen; Magid, Jakob. **Assessment of lettuces grown in urban areas for human consumption and as bioindicators of atmospheric pollution**. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 256, p. 114883, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114883>. Acesso em: 05 maio 2026.

JOVANIĆ, B. R.; RADENKOVIĆ, B.; DESPOTOVIĆ-ZRAKIĆ, M.; BOGDANOVIĆ, Z.; BARAC, D. **Effect of UV-B radiation on chlorophyll fluorescence, photosynthetic activity and relative chlorophyll content of five different corn hybrids**. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, v. 10, e100115, 2022. DOI: 10.1016/j.jpap.2022.100115. Acesso em: 02 fev. 2026.

KAMIŃSKI, J.; STACHELSKA-WIERZCHOWSKA, A.; MICHALCZYK, D. J.; KLIMKOWICZ-PAWLAS, A.; OLKOWSKA, E.; WOLSKA, L.; PIOTROWICZ-CIEŚLAK, A. I. **Mudanças no metabolismo e conteúdo de clorofila na lentilha-d'água comum (*Lemna minor* L.) causadas por contaminação ambiental com fluoretos**. *Molecules*, v. 29, n. 10, p. 2336, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules29102336>. Acesso em: 25 out. 2025.

KARNOVSKY, M. J. **A formaldehyde-glutaraldehyde fixative of high osmolality for use in electron microscopy**. *Journal of Cell Biology*, New York, v. 27, p. 137A–138A, 1965. Disponível em: <https://doi.org/10.1083/jcb.27.2.137A>. Acesso em: 16 mar. 2026.

KOLAH, M.; MOHAJEL KAZEMI, E.; YAZDI, M.; GOLDSON-BARNABY, A. *Oxidative stress induced by cadmium in lettuce (*Lactuca sativa* Linn.): oxidative stress indicators and prediction of their genes*. *Elsevier Plant Physiology and Biochemistry*, v. 146, p. 71–89, 2020. Disponível em: 10.1016/j.plaphy.2019.10.032. Acesso em: 18 maio 2026.

KUMARI, S.; DHANKHAR, H.; ABROL, V. **Bioaccumulation of fluoride toxicity in plants and its effects on plants and techniques for its removal**. In: YADAV, A. K.; SHIRIN, S.; SINGH, V. P. (ed.). *Advanced treatment technologies for fluoride removal in*

water: water purification. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 271–290. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-27232-6_13. Acesso em: 23 nov. 2025.

Kumar, S., Shenoy, S., Swamy, RS, Ravichandiran V. e Kumar N. **Disfunção mitocondrial induzida por fluoreto e abordagens para sua intervenção**. *Biol Trace Elem Res* **202** , 835–849 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03720-1>. Acesso em: 11 abril. 2026.

LABOURIAU, L. G.; VALADARES, M. E. B. **On the germination of seeds *Calotropis procera* (Ait.) Ait.f.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 48, n. 2, p. 263–284, 1976. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/8R8L4rKpQ5bRjzq8F5gH9hF/?lang=en>. Acesso em: 23 nov. 2025.

Laisk A , Loreto F. 1996.**parâmetros de CO₂ foliare da fluorescência da clorofila (fator de especificidade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase, respiração no escuro na presença de luz, distribuição da excitação entre fotossistemas, taxa de transporte alternativo de elétrons e resistência à difusão do mesófilo)** .Plant Physiology 110 :903-912.

LANA, M. M.; TAVARES, S. A. (Ed.). **50 hortaliças: como comprar, conservar e consumir**. 2. ed. rev. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 209 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/854775>. Acesso em: 23 nov. 2025.

LIMA, D. A.; MÜLLER, C.; COSTA, A. C.; BATISTA, P. F.; DALVI, V. C.; DOMINGOS, M. **Alterações morfoanatômicas e fisiológicas em *Bauhinia variegata* L. como indicadores da ação do herbicida diuron**. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 141, p. 242–250, 2017. Disponível em: <coloque-o-link-aqui>. Acesso em: 9 abr. 2024.

MAGUIRE, J. D. **Speed of germination—aids in selection and evaluation for seedling emergence and vigor**. Crop Science, v. 2, n. 2, p. 176–177, 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>. Acesso em: 23 nov. 2025.

MALDONADE, I. R.; MATTOS, L. M.; MORETTI, C. L. **Manual de boas práticas agrícolas na produção de alface**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2014. 44 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1002070/1/COT112Manualdeboaspraticasagricolasnaproducaodealface.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2025.

MARSCHNER, H. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>. Acesso em: 25 out. 2025.

MESQUITA, Geisa Lima. **Efeitos da absorção do flúor atmosférico sobre o desenvolvimento e estado nutricional vegetal**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) — Instituto Agrônomo, Campinas, 2010. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/pb00017.pdf. Acesso em: 16 abr. 2026.

MONTEIRO, M. B. **Poluição atmosférica na indústria de fertilizantes: identificação das fontes e tecnologias de controle**. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia Química) –

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/23455>. Acesso em: 23 nov. 2025.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: BARROS, A. S. R.; CUSTÓDIO, C. C.; DIAS, D. C. F. S.; PINHO, É. V. R. V.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; GOMES-JUNIOR, F. G.; OLIVEIRA, J. A.; NAKAGAWA, J.; FRANÇA-NETO, J. B.; MARCOS-FILHO, J.; DIAS, M. C. L. L.; PANOBIANCO, M.; OHLSON, O. C.; AGUIAR, R. P.; VIEIRA, R. D.; SILVA, R. C.; CICERO, S. M.; CARVALHO, T. C. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. cap. 2, p. 1–24. Disponível em: https://www.abrates.org.br/images/stories/abras/publicacoes/livros/vigor_de_sementes_conceitos_e_testes.pdf. Acesso em: 23 nov. 2025.

NANNI, A. S. **O flúor em águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: origem e condicionamento geológico**. 2008. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/14089>. Acesso em: 23 nov. 2025.

NASCIMENTO, W. M. **Germinação de sementes de hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2003. 9 p. (Circular Técnica, 27). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/783372/1/Cirtec27.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2025.

O'BRIEN, T. P.; FEDER, N.; McCULLY, M. E. **Polychromatic staining of plant cell walls by toluidine blue O**. *Protoplasma*, v. 59, n. 2, p. 368–373, 1964. DOI: 10.1007/BF01248568. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01248568>. Acesso em: 23 nov. 2025.

Organização Mundial da Saúde (OMS). **Poluição do ar**. 2021. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>. Acesso em: 8 maio 2026.

PANDEY, S. **Toxicity of fluoride to microbial activity and population in soil**. *PhytoTalks*, v. 1, n. 1, p. 29–37, 2024. Disponível em: <https://phytotalks.com/index.php/pt/article/view/7/201>. Acesso em: 25 out. 2025.

PAULA, M.; MARIMON, C.; ROISENBERG, A. **O flúor nas águas subterrâneas da Formação Santa Maria, na região de Santa Cruz do Sul e Venâncio Aires, RS, Brasil**. [S.l.: s.n.], 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7289/000541806.pdf>. Acesso em: 27 out. 2025.

PELC, J.; ŚNIOŚZEK, M.; WRÓBEL, J.; TELESÍŃSKI, A. **Effect of fluoride on germination, early growth and antioxidant enzymes activity of three winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars**. *Applied Sciences*, v. 10, p. 6971, 2020. DOI: 10.3390/app10196971. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10196971>. Acesso em: 22 abr. 2026.

PRYSTUPA, J. **Fluorine—a current literature review: an NRC and ATSDR based review of safety standards for exposure to fluorine and fluorides**. *Toxicology Mechanisms and Methods*, v. 21, n. 2, p. 103–170, fev. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.3109/15376516.2010.542931>. Acesso em: 23 nov. 2025.

RAMTEKE, L. P.; SAHAYAM, A. C.; GHOSH, A.; RAMBABU, U.; REDDY, M. R. P.; POPAT, K. M.; REBARY, B.; KUBAVAT, D.; MARATHE, K. V.; GHOSH, P. K. **Study of fluoride content in some commercial phosphate fertilizers.** *Journal of Fluorine Chemistry*, v. 210, p. 149–155, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2018.03.018>. Acesso em: 29 out. 2025.

Ram, SS, Majumder, S., Chaudhuri, P., Chanda, S., Santra, SC, Chakraborty, A., & Sudarshan, M. (2015). **Uma revisão sobre o monitoramento e gerenciamento da poluição do ar usando plantas com referência especial à adsorção de poeira foliar e respostas fisiológicas ao estresse.** *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45 (23), 2489–2522. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1046775>. Acesso em: 15 maio 2026.

RIBEIRO, A. A.; SIMEÃO, M.; SANTOS, D. P. **Crescimento da alface cultivada em solução nutritiva com diferentes concentrações de cálcio.** *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas, Tupã*, v. 9, n. 4, p. 298–303, 2015. DOI: <https://doi.org/10.18011/bioeng2015v9n4p298-303>. Disponível em: <https://seer.tupa.unesp.br/BIOENG/article/view/341>. Acesso em: 18 mar. 2026.

RODRIGUES, A. A.; RODRIGUES, D. A.; SALES, J. F.; VASCONCELOS FILHO, S. C.; COSTA, A. C.; RODRIGUES, C. L.; SILVA, A. A.; DOMINGOS, M.; MÜLLER, C. **Indicadores morfoanatómicos, fisiológicos e bioquímicos em *Lactuca sativa* L.: germinação e crescimento em resposta ao flúor.** *Plants, Basel*, v. 11, n. 23, p. 3406, 2022. DOI: 10.3390/plants11233406. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11233406>. Acesso em: 9 fev. 2026.

RODRIGUES, A. A.; OLIVEIRA, R. S.; SOUZA, L. A.; GUIMARÃES, T. M.; SOUZA, G. M.; OLIVEIRA, M. T. **O flúor na chuva simulada afeta a morfoanatomia e a fisiologia do *Eugenia disenterica* (Mart.) DC.** *Ecological Indicators*, v. 82, p. 189–195, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.005>. Acesso em: 23 nov. 2025.

RODRIGUES, Leôncio Gonçalves; LIMA, José Ferreira de; SANTOS, Luan Carlos dos; SOUSA, Paulo Henrique de; OLIVEIRA, Maria Eduarda Silva de; SILVA, Matheus Henrique da. **Crescimento inicial da alface hidropônica sob diferentes níveis de salinidade em sistema automatizado com Arduino Uno em função da temperatura e umidade do ar no semiárido.** *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 1, p. e34311125136, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/25136>. Acesso em: 23 nov. 2025.

RUDNICK, R. L.; GAO, S. **Composition of the continental crust.** In: HOLLAND, H. D.; TUREKIAN, K. K. (ed.). *Treatise on Geochemistry*. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2014. p. 1-51. Disponível em DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6. Acesso em: 14 maio 2026.

SAINI, Poonam; KHAN, Suphiya; BAUNTHIYAL, Mamta; SHARMA, Vinay. **Effects of fluoride on germination, early growth and antioxidant enzyme activities of legume plant species *Prosopis juliflora*.** *Journal of Environmental Biology*, v. 34, n. 2, p. 205–209, mar. 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24620580/>. Acesso em: 6 abr. 2026.

Sánchez-Moreiras AM, Graña E, Reigosa MJ and Araniti F (2020) **Imaging of Chlorophyll a Fluorescence in Natural Compound-Induced Stress Detection.** *Front. Plant Sci.* 11:583590. doi: 10.3389/fpls.2020.583590. Acesso em: 10 abr. 2026.

SANJUAN MONTEBELLO, A. E.; SILVA, A. P. da; OLIVEIRA, M. C. de; COSTA, J. F. da; SOUZA, R. T. de. **Variáveis que afetam a decisão de compra do consumidor de hortaliças. DELOS: Desenvolvimento Local Sustentável**, v. 17, n. 58, p. 01–12, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n58-021>. Acesso em: 23 nov. 2025.

SANT'ANNA-SANTOS, B. F.; AZEVEDO, A. A.; FERNANDES, G. W.; SANTOS, M. G. **Fluoride effects on the leaf morphology of plant species with potential for biomonitoring air pollution.** *Environmental and Experimental Botany*, v. 85, p. 34–42, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.07.003>. Acesso em: 22 nov. 2025.

SANT'ANNA-SANTOS, B. F.; FREITAS-SILVA, L.; AZEVEDO, A. A.; GOMES, M. P. **Could the fluoride-tolerant species *Panicum maximum* replace sensitive plants in fluoride biomonitoring?** *Ecological Indicators*, v. 121, 107308, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107308>. Acesso em: 22 nov. 2025.

SILVA, I. M. H. de L.; RODRIGUES, A. A.; SALES, J. F.; RODRIGUES, D. A.; VASCONCELOS FILHO, S. C.; RODRIGUES, C. L.; BATISTA, P. F.; COSTA, A. C.; DOMINGOS, M.; MÜLLER, C.; SILVA, A. A. **Indicadores do efeito do flúor em sementes e mudas de *Phaseolus vulgaris*.** *PeerJ*, v. 10, e13434, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj.13434>. Acesso em: 23 nov. 2025.

SILVA, M. H. da; OLIVEIRA, R. A.; SOUSA, J. P.; LIMA, T. C.; FERREIRA, L. M.; MOURA, D. F.; SANTOS, E. F. dos; COSTA, A. L. **Cultivo de alface utilizando substratos alternativos.** *Scientia Naturalis*, v. 2, n. 2, p. 819–827, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/index.php/SciNat/article/view/4249>. Acesso em: 7 out. 2024.

SILVA, Leonardo Mendes da; DUTRA, Vanessa de Souza Vieira; BORG, Ana Letícia; NASCIMENTO, Carla Maria Souza; OLIVEIRA, José Emílio Zanzirolani de. **Ecotoxicidade do corante Vermelho Direto 09 utilizando *Eisenia fetida* (Savigny in Cuvier, 1826) e *Lactuca sativa* L. como indicadores biológicos.** *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 9, n. 3, p. 196–204, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.24221/jeap.9.3.2024.5910.196-204>. Acesso em: 30 out. 2025.

SILVA, Maressa Hungria de Lima e; RODRIGUES, A. Almeida; SALES, J. de Fátima; RODRIGUES, D. Almeida; VASCONCELOS FILHO, S. Carvalho; RODRIGUES, C. Lino; BATISTA, P. Ferreira; COSTA, A. Carlos; DOMINGOS, M.; MÜLLER, C.; SILVA, A. Alves da. **Fluoride effect indicators in *Phaseolus vulgaris* seeds and seedlings.** *PeerJ*, v. 10, p. e13434, 17 maio 2022. DOI: 10.7717/peerj.13434. Acesso em: 09 fev. 2026.

SINGH, G.; KUMARI, B.; SINAM, G.; KRITI; KUMAR, N.; MALLICK, S. **Fluoride distribution and contamination in the water, soil and plants continuum and its remedial technologies: an Indian perspective – a review.** *Environmental Pollution*, v. 239, p. 95–108, ago. 2018. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.04.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.002>. Acesso em: 11 fev. 2026.

STRUNECKA, A.; STRUNECKY, O. **Mecanismos de toxicidade do flúor: das enzimas às redes integrativas subjacentes**. Applied Sciences, v. 10, n. 20, p. 7100, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10207100>. Acesso em: 29 out. 2025.

SULERIA, Hafiz Ansar Rasul; MASCI, Paola P.; ALYOUSEF, Hatim; BARROW, Colin J.; RUTHERFORD, Dewen; MERCER, Anna; RICHARDSON, Craig; RICHARDSON, Jason. **Fitoquímicos, nutrição, metabolismo, biodisponibilidade e benefícios para a saúde na alface — uma revisão abrangente**. Antioxidants, v. 11, n. 6, p. 1158, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/antiox11061158>. Acesso em: 23 nov. 2025.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo; MØLLER, Ian Max; MURPHY, Angus. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. Tradução: Alexandra Antunes Mastroberti et al.; revisão técnica: Paulo Luiz de Oliveira. ISBN 978-85-8271-367-9. Disponível em: <https://archive.org/details/taiz-zeiger-fisiologia-vegetal-6a-ed>. Acesso em: 25 out. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Basic information about air emissions monitoring**. Washington, DC, 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/basic-information-about-air-emissions-monitoring#ambient>. Acesso em: 15 maio 2026.

VARGAS, P. R. **Variáveis físicas, químicas e microbiológicas de água de consumo humano; contaminantes ambientais emergentes**. 2023. 156 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Alimentos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/29463>. Acesso em: 14 out. 2024.

WANG, M.; CHEN, Z.; CHEN, D.; LIU, L.; HAMID, Y.; ZHANG, S.; SHAN, A.; KANG, K. J.; FENG, Y.; YANG, X. **Combined cadmium and fluorine inhibit lettuce growth through reducing root elongation, photosynthesis, and nutrient absorption**. Environmental Science and Pollution Research International, v. 29, n. 60, p. 91255–91267, dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22195-6>. Acesso em: 30 out. 2025.

YADAV, Krishna Kumar; KUMAR, Suraj; PHAM, Quoc Bao; SINGH, Neeraj; KUMAR, Vivek; DAS, Surajit; SINGH, Jay Shankar; KUMAR, Anil; YADAV, Mukesh; RAI, Prabhat Kumar. **Fluoride contamination, health problems and remediation methods in Asian groundwater: a comprehensive review**. Ecotoxicology and Environmental Safety, [S.l.], v. 182, p. 109362, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.06.045>. Acesso em: 10 set. 2025.

Zatelli, Katucia Sandra. **Bioindicadores: conceito e aplicação**. Blog Mata Nativa, 26 fev. 2019. Disponível em: <https://matanativa.com.br/bioindicadores-conceito-aplicacao/>. Acesso em: 08 maio 2026.

ZHA, Ling; LIU, Wei; ZHANG, Yuxin; ZHOU, Chuan; SHAO, Ming'an. **Respostas morfológicas e fisiológicas do estresse em alface sob diferentes intensidades de luz contínua**. Frontiers in Plant Science, v. 10, art. 1440, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01440>. Acesso em: 24 nov. 2025.

ZHANG, Lian; LIU, Xiaoyan. **Effects of heavy metals and metalloids on root morphology and anatomy in plants.** *Environmental Pollution*, v. 287, p. 117620, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117620>. Acesso em: 24 nov. 2025.