

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13 **UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

14 **ALTERAÇÕES MORFOANATOMICAS E FISIOLÓGICAS EM PLANTAS**
15 **CONTAMINADAS POR FLÚOR – UMA REVISÃO**
16
17
18
19
20
21
22

23 **ADRIANA RIBEIRO DAMACENA**
24 **Orientadora: Luzimar Campos da Silva**
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39

40 Viçosa – MG
41 2025

42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84


3
4

ADRIANA RIBEIRO DAMACENA


**ALTERAÇÕES MORFOANATOMICAS E FISIOLÓGICAS EM PLANTAS
CONTAMINADAS POR FLÚOR – UMA REVISÃO**

Monografia apresentada ao Curso
de Ciências Biológicas da Universidade
Federal de Viçosa como requisito para
obtenção do título de bacharel em
Ciências Biológicas.

APROVADA: 27 de junho de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANA RIBEIRO DAMACENA**
Data: 05/07/2025 00:20:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Adriana Ribeiro Damacena
(Bacharelanda)
(UFV)

Documento assinado digitalmente
 **LUZIMAR CAMPOS DA SILVA**
Data: 04/07/2025 11:09:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Luzimar Campos da Silva
(Orientadora)
(UFV)

85 **Resumo:**

86 O flúor é um poluente persistente e não degradável, emitido por atividades industriais como
87 na produção de alumínio, na fabricação de cerâmica e no processamento de aço. Seu acúmulo
88 no ambiente leva a diversos efeitos fitotóxicos no desenvolvimento das plantas, mesmo em
89 baixas concentrações. Esta revisão teve como objetivo reunir evidências científicas sobre os
90 principais efeitos bioquímicos, fisiológicos, anatômicos e morfológicos do flúor nas plantas,
91 além de discutir o uso dessas espécies no biomonitoramento da poluição ambiental. O
92 trabalho abrange estudos com espécies de interesse econômico e ecológico, sendo que os
93 principais processos afetados incluem fotossíntese, atividade enzimática, síntese de clorofila e
94 metabolismo oxidativo. Além de sintomas visíveis como clorose e necrose, danos estruturais
95 em nível celular – como retração de protoplastos, deformação estomática e desorganização do
96 mesofilo – são comuns. Também enfatizamos o papel das espécies vegetais como
97 biomonitores da poluição atmosférica por flúor e a necessidade de pesquisas futuras sobre
98 mecanismos de tolerância, particularmente em espécies nativas ou endêmicas. Compreender
99 as respostas das plantas ao flúor é essencial para o monitoramento ambiental e estratégias de
100 conservação em meio aos crescentes impactos industriais.

101

102 Palavras-chave: Fitotoxicidade, Metabolismo vegetal, Danos anatômicos, Biomonitoramento.

103

104

105

106

107

108

109

110

5

6

111

112 **Introdução**

113 O flúor (F) é um elemento químico pertencente ao grupo dos halogênios na Tabela
114 Periódica, caracterizando-se por sua elevada eletronegatividade — sendo o mais
115 eletronegativo dentre todos os elementos — e alta reatividade. Essas propriedades explicam,
116 em parte, sua ampla capacidade de formar compostos, especialmente fluoretos, com diversos
117 elementos e materiais presentes no ambiente. Devido à sua intensa reatividade, o flúor não
118 ocorre em estado livre na natureza, sendo encontrado predominantemente em minerais como
119 fluorita (CaF_2), criolita (Na_3AlF_6) e apatita [$(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH}))$] (ATSDR, 2003; Barbier et
120 al., 2010; WHO, 2020). A partir desses minerais, o flúor é extraído e utilizado em diferentes
121 processos industriais, incluindo a fabricação de alumínio, fertilizantes fosfatados, vidro,
122 cerâmica e produtos farmacêuticos, atividades que contribuem significativamente para a sua
123 liberação no ambiente, principalmente na forma de fluoreto de hidrogênio (HF) (Camargo,
124 2003; Weinstein; Davison, 2004; Vithanage; Bhattacharya, 2015; Zouari *et al.*, 2017). O flúor
125 atmosférico, emitido na cadeia produtiva de usinas e indústrias, é capaz de danificar os
126 tecidos vegetais e alterar, visualmente, as plantas próximas ou não às fontes emissoras de
127 poluentes. (Fornasiero, 2001). Além disso, o flúor apresenta alta capacidade de
128 bioacumulação, o que contribui para o aumento de sua concentração no ambiente, tornando-o
129 um dos principais poluentes causadores de danos em espécies vegetais (Gadi *et al.*, 2020;
130 Kumar *et al.*, 2021). Esses danos não comprometem apenas o desenvolvimento e
131 produtividade das plantas, mas também podem impactar negativamente comunidades vegetais
132 e redes ecológicas mais amplas (Domingos *et al.*, 2003; Louback *et al.*, 2016; Anjos *et al.*,
133 2018; Yang *et al.*, 2024; Gomes *et al.*, 2021, 2025).

134 A toxicidade do flúor afeta de forma diferente as plantas, que podem ser classificadas
135 como sensíveis ou tolerantes (Gadi *et al.*, 2020). A amplitude dos efeitos induzidos depende
136 de diferentes fatores, como o genótipo da planta, a fase de desenvolvimento foliar, o tempo de
137 exposição, a concentração de flúor presente na atmosfera e a distância da fonte emissora
138 (Weinstein; Davison, 2004; Zhao *et al.*, 2022).

139 As espécies vegetais podem ser classificadas em tolerantes ou sensíveis a
140 contaminantes ambientais com base em sua capacidade de resistir, adaptar-se ou manifestar
141 sintomas diante da exposição a agentes tóxicos, como o flúor. (Markert *et al.*, 2003). Plantas
142 sensíveis tendem a apresentar alterações morfológicas visíveis, como clorose, necrose e
143 redução do crescimento, além de distúrbios fisiológicos severos quando expostas a níveis
144 relativamente baixos do poluente (Anjos *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2018b). Em
145 contrapartida, plantas tolerantes conseguem manter, ao menos em parte, seus processos
146 fisiológicos e estruturais em equilíbrio, mesmo sob concentrações elevadas de flúor, embora
147 possam acumular o elemento em seus tecidos sem apresentar sintomas externos evidentes
148 (Carvalho *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2023).

149 O biomonitoramento é uma ferramenta eficaz para avaliar os efeitos da poluição
150 atmosférica por flúor, utilizando espécies vegetais como bioindicadoras. A sensibilidade de
151 certas plantas às alterações provocadas por contaminantes permite identificar seus impactos
152 mesmo na ausência de sintomas visuais, revelando danos anatômicos e fisiológicos sutis que
153 funcionam como biomarcadores (Peixoto *et al.*, 2005; Carvalho Silva *et al.*, 2020; Gomes *et*
154 *al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2022).

155 Mesmo em baixas concentrações, o flúor é rapidamente absorvido pelas folhas por
156 deposição ou por via estomática (Rhim *et al.*, 2016; Mondal, 2017; Kumar *et al.*, 2021). A
157 exposição ao poluente resulta em uma série de respostas fisiológicas, morfológicas,
158 anatômicas e bioquímicas, como clorose, necrose, alterações metabólicas, danos teciduais e

159 aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), conforme evidenciado em
160 diversos estudos (Baunthiyal; Sharma, 2014; Zouari *et al.*, 2017; Choudhary *et al.*, 2019;
161 Gupta *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2018a, 2022). A identificação desses efeitos é
162 fundamental não apenas para o diagnóstico da contaminação ambiental, mas também para o
163 uso dessas plantas como bioindicadoras.

164 Diante disso, esta revisão tem como objetivo reunir evidências científicas com base em
165 diferentes trabalhos onde foram estudadas espécies vegetais de interesse econômico e
166 ecológico sobre os principais efeitos bioquímicos, fisiológicos, anatômicos e morfológicos do
167 flúor nas plantas, além de discutir o uso dessas espécies no biomonitoramento da poluição
168 ambiental, tanto em ambientes controlados quanto em condições de campo.

169 **Absorção e Translocação**

170 A absorção do flúor gasoso pelas plantas acontece predominantemente nas folhas, seja
171 por deposição direta de partículas ou pela absorção gasosa do HF (Weinstein; Davison, 2003).
172 Em solução aquosa, o flúor também pode ser absorvido por toda a superfície da lâmina foliar
173 (Rodrigues *et al.*, 2017; Anjos *et al.*, 2018). Em solos contaminados, o elemento é absorvido
174 pelo sistema radicular, especialmente quando em altas concentrações (Baunthiyal; Ranghar,
175 2014; Kumar *et al.*, 2021; Choubisa, 2023).

176 No estado gasoso, o flúor é absorvido pelas folhas através dos estômatos e translocado
177 pelo mesofilo por canais de ânions nas membranas plasmáticas ou via apoplasto (Rhimi *et al.*,
178 2016; Mondal, 2017; Anjos *et al.*, 2018; Gomes *et al.*, 2021). Após sua absorção, o flúor
179 tende a se acumular nos tecidos foliares, onde se liga a íons cálcio, formando fluoreto de
180 cálcio (CaF₂), o que limita sua mobilidade dentro da planta (Weinstein; Davison, 2004; Gadi
181 *et al.*, 2020). A eficiência da translocação e os danos celulares associados à presença do flúor

182 estão relacionados à concentração atmosférica do elemento, ao tempo de exposição, ao
183 estágio foliar e à tolerância de cada espécie.

184 **Mudanças Metabólicas e Fisiológicas**

185 As alterações fisiológicas causadas pelo flúor em plantas têm sido alvo de estudos
186 importantes, pois as plantas expostas a esse poluente podem apresentar distúrbios fisiológicos
187 mesmo na ausência de sintomas morfológicos visíveis. Isso ocorre porque os processos
188 fisiológicos são geralmente mais sensíveis e respondem de forma mais rápida à presença de
189 contaminantes. O flúor pode afetar negativamente a atividade de enzimas metabólicas
190 essenciais, reduzir a atividade hormonal, além de comprometer a germinação e o crescimento
191 (Das; Roychoudhury, 2014; Sharma; Kaur, 2018; Chahine *et al.*, 2023; Singh *et al.*, 2023).
192 Além disso, esse elemento interfere na taxa fotossintética, diminuindo o conteúdo de clorofila,
193 inibindo enzimas como a RuBisCO e a ATP-sintase, e reduzindo a eficiência do fotossistema
194 II (PSII) (Shan *et al.*, 1995; Kumar *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2023; Krasavtseva; Makarov,
195 2024; Yang *et al.*, 2024; Gomes *et al.*, 2025). A clorofila, principal pigmento fotossintético, é
196 essencial para a captação da luz solar e a conversão de energia durante a fotossíntese,
197 processo indispensável para o desenvolvimento, acúmulo de biomassa e produtividade vegetal
198 (Gadi *et al.*, 2020).

199 Plantas submetidas a estresses bióticos e abióticos aumentam a produção de EROs,
200 que são compostos instáveis e altamente reativos capazes de provocar oxidação de lipídios,
201 membranas, DNA, pigmentos e até causar morte celular (Barreiros *et al.*, 2006; Gill; Tuteja,
202 2010; Oliveira; Schoffen, 2010; Hasanuzzaman & Fujita, 2022). Entretanto, as plantas
203 possuem mecanismos que mantêm as EROs em níveis controlados, e o equilíbrio entre a
204 geração de EROs e a ação antioxidante determina a sensibilidade da espécie aos danos
205 causados pelo estressor (Scandalios, 1993; Valko *et al.*, 2005; Kováčik *et al.*, 2010; Kumar *et*
206 *al.*, 2012; Achary *et al.*, 2012; Sheng *et al.*, 2015). O estresse oxidativo representa uma

207 resposta fisiológica recorrente em plantas expostas ao flúor, sendo caracterizado tanto pelo
208 aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) quanto pela elevação dos
209 níveis de malondialdeído (MDA), um marcador de danos oxidativos às membranas celulares.
210 Paralelamente, observa-se a inibição de importantes enzimas do sistema antioxidante, como a
211 superóxido dismutase (SOD), a catalase (CAT) e a peroxidase (POX), responsáveis por
212 neutralizar os efeitos tóxicos das EROs e preservar o equilíbrio celular (Das; Roychoudhury,
213 2014; Hossain et al., 2015; Zouari et al., 2017; Sharma; Kaur, 2018; Wang et al., 2024). Além
214 disso, observam-se alterações no metabolismo secundário, como mudança na produção de
215 compostos fenólicos, impactando a qualidade fisiológica e produtiva das plantas. Tais
216 respostas reforçam o potencial fitotóxico do flúor (Li et al., 2011; Y et al., 2023; Yang et al.,
217 2024).

218 Pelc et al. (2020) observaram em *Triticum aestivum* L. que a aplicação de fluoreto de
219 sódio (NaF) reduziu drasticamente a atividade da CAT, chegando a 97% de inibição em
220 embriões e raízes, além de alterar a atividade da POX, evidenciando comprometimento na
221 desintoxicação das EROs. Resultados semelhantes foram encontrados para oliveira (*Olea*
222 *europaea* L. cv. Zelmati), onde doses moderadas de NaF estimularam a atividade de SOD,
223 CAT e glutathione peroxidase, protegendo contra danos oxidativos, embora concentrações
224 elevadas (80 mM) tenham reduzido essa atividade (Zouari et al., 2017).

225 Peixoto et al. (2005), ao estudar *Salvinia auriculata* Aubl., observaram aumento na
226 atividade das enzimas polifenol oxidase (POL), POX e SOD proporcional às concentrações de
227 flúor, enquanto a CAT foi reduzida após 96 horas do término da exposição.

228 **Alterações no Crescimento Vegetal**

229 Estudos recentes têm investigado os efeitos do flúor sobre o crescimento vegetal,
230 revelando padrões consistentes de resposta entre diferentes espécies. Em estudos com feijão

231 africano (*Phaseolus vulgaris* L. var. Jesca) e alface (*Lactuca sativa* L.), concentrações de
232 flúor entre 10 e 30 mg L⁻¹ afetaram significativamente a germinação, o alongamento
233 radicular, o crescimento da parte aérea, diminuíram os níveis de clorofila e a eficiência
234 fotossintética, além de alterarem marcadores fisiológicos como o fotossistema II (PSII)
235 (Nawaz *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2022; Chahine *et al.*, 2023). Krasavtseva e Makarov
236 (2024) verificaram em aveia (*Avena sativa* L.) que soluções com até 90 mg L⁻¹ de fluoreto
237 reduziram o comprimento radicular em cerca de 35% e diminuíram altura e biomassa em até
238 62% sob exposições elevadas. Em trigo cultivado em solo contaminado (até 200 mg kg⁻¹), o
239 fluoreto reduziu expressivamente a altura das plantas, o número de folhas e aumentou lesões
240 foliares, associadas ao acúmulo de flúor e desequilíbrio nutricional (Ahmad *et al.*, 2022).

241 Fina *et al.* (2016) compararam os efeitos do flúor na germinação e crescimento de
242 milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) e sorgo (*Sorghum vulgare*), constatando que
243 concentrações moderadas a altas de fluoreto (50 a 250 µg mL⁻¹) reduziram a massa fresca em
244 cerca de 20%. Além disso, o flúor inibiu enzimas essenciais para a germinação, como a
245 α-amilase e a enolase, e comprometeu o desenvolvimento radicular e foliar, principalmente
246 em trigo (*Triticum aestivum*) (Singh *et al.*, 2023). Esses achados indicam que o flúor exerce
247 efeitos tóxicos generalizados sobre o crescimento vegetal, com variações de sensibilidade
248 entre espécies, afetando desde a germinação até o desenvolvimento da biomassa.

249 **Alterações na Fotossíntese**

250 Plantas expostas a poluentes frequentemente apresentam redução da fotossíntese
251 devido a danos na estrutura dos cloroplastos, principal sítio de acúmulo de flúor, causando
252 prejuízos nas taxas fotossintéticas (Miller, 1993). A inibição enzimática, a assimilação de
253 carbono e a síntese de clorofila também são afetadas. O flúor, elemento altamente
254 eletronegativo, pode se ligar a íons magnésio formando fluoretos metálicos, interferindo na

255 síntese da clorofila (McNulty; Newman, 1961; Miller, 1993; Fornasiero, 2001; Abdallah *et*
256 *al.*, 2006).

257 Kamiński *et al.* (2024) observaram em *Lemna minor* L. que a contaminação por
258 fluoretos reduziu os níveis de clorofila *a* e *b*, danificou cloroplastos e inibiu a fotólise da água,
259 interferindo na cadeia de transporte de elétrons do PSII, incluindo a substituição do Cl⁻ pelo
260 F⁻, o que reduz a eficiência quântica total do PSII e afeta a síntese de ATP. Mesquita *et al.*
261 (2013) relataram redução na condutância estomática e degradação dos pigmentos
262 fotossintéticos em culturas de café, laranja e hortaliças, diminuindo a assimilação de CO₂.

263 Fan *et al.* (2022) avaliaram que a exposição combinada a fluoreto e alumínio reduziu
264 significativamente o teor de clorofila e prejudicou parâmetros fotossintéticos, indicando
265 comprometimento do PSII, mas que, em baixas concentrações, o flúor atenuou parcialmente
266 os efeitos negativos do alumínio.

267 Peixoto *et al.* (2005) constataram em *S. auriculata* que as concentrações de clorofila *a*,
268 *b* e carotenóides totais diminuíram em resposta ao aumento das concentrações de flúor,
269 enquanto a concentração de antocianinas aumentou proporcionalmente. Ribeiro (2008)
270 avaliou a sensibilidade ao flúor de três espécies nativas brasileiras — *Schinus terebinthifolius*
271 Raddi., *Tibouchina granulosa* (Desr.) Cogn. e *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish —
272 observando decréscimo na taxa fotossintética e na condutância estomática em todas, exceto
273 em *E. erythropappus*, que manteve a taxa fotossintética inalterada, embora com redução dos
274 pigmentos fotossintéticos. Dentre as espécies, *T. granulosa* foi a mais sensível, e *E.*
275 *erythropappus* a mais tolerante ao flúor.

276 Pires (2010) corroborou a tolerância de *E. erythropappus*, sem alteração significativa
277 nos parâmetros fisiológicos e na permeabilidade das membranas em resposta ao flúor,
278 caracterizando essa espécie como resistente ao poluente.

279 Poluentes fitotóxicos como o flúor podem alterar o funcionamento das membranas dos
280 tilacóides (Baker; Rosenqvist, 2004), afetando a fluorescência da clorofila *a*, que é um bom
281 indicador da eficiência do PSII (Lüttge, 2008). Pereira (2013) analisou *Cupania vernalis*
282 Cambess. e *Plinia cauliflora* (Mart.) Kausel, constatando redução no rendimento potencial
283 quântico do PSII (Fv/Fm) apenas em *C. vernalis*, bem como aumento do coeficiente de
284 extinção não fotoquímico (NPQ), mecanismo de proteção das plantas em situações de estresse
285 (Ribeiro, 2009; Silva *et al.*, 2011).

286 Estudos em espécies nativas brasileiras indicam sensibilidade variada ao flúor.
287 *Byrsonima basiloba* A. Juss., submetida a chuva simulada com flúor, apresentou diminuição
288 da fotossíntese e aumento da respiração, que é importante para o fornecimento de energia em
289 processos de defesa (Rodrigues *et al.*, 2018b; Farnese *et al.*, 2017). Indivíduos expostos a
290 menores concentrações foram capazes de reprogramar seu metabolismo, aumentando a síntese
291 de antioxidantes e processos de respiração e fotorrespiração, o que representa um mecanismo
292 de defesa importante e potencial para programas de bioindicação.

293 De forma similar, *Sapindus saponaria* L. mostrou sensibilidade ao flúor, com danos
294 fotossintéticos nas maiores concentrações (Rodrigues *et al.*, 2018a), sendo recomendada como
295 bioindicadora. *Spondias mombin* L. teve redução drástica na taxa fotossintética, afetando
296 tanto a fase fotoquímica quanto a bioquímica da fixação de carbono (Rodrigues *et al.*, 2020a).
297 *Eugenia dysenterica* (Mart.) DC apresentou redução no teor de clorofila e parâmetros
298 fotoquímicos sob exposição ao flúor, sendo também indicada como bioindicadora (Rodrigues
299 *et al.*, 2017).

300 **Alterações anatômicas**

301 A exposição das plantas ao flúor acarreta prejuízos significativos à anatomia foliar, os
302 quais frequentemente antecedem os sintomas visuais. Dentre essas alterações estruturais,

303 destacam-se: desorganização do parênquima, retração e colapso do protoplasto, espessamento
304 ou rompimento da epiderme, danos em tricomas, deformação e destruição dos estômatos,
305 (Rossi *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*, 2020; Gomes *et al.*, 2021, 2025).

306 A epiderme, como tecido de revestimento, constitui a primeira barreira ao agente
307 fitotóxico. O revestimento fortemente hidrofóbico limita a molhabilidade, ou seja, minimiza o
308 tempo e a área de contato do flúor com a superfície foliar (Anjos *et al.*, 2018). Os danos na
309 epiderme demonstram os efeitos da interação do flúor com a cutícula, tanto em plantas
310 mantidas sob condições controladas quanto em estudos de campo (Sant'Anna-Santos e
311 Azevedo, 2007; Sant'Anna-Santos *et al.*, 2007; Rossi *et al.*, 2016; Anjos *et al.*, 2018; Gomes
312 *et al.*, 2021). A degradação dessa barreira permite o acesso do flúor aos espaços intercelulares
313 do mesofilo, expondo os tecidos e possibilitando a proliferação de patógenos (Sant'Anna-
314 Santos *et al.*, 2007; Louback *et al.*, 2016; Anjos *et al.*, 2018).

315 Danos aos apêndices epidérmicos são recorrentes. Em espécies que apresentam
316 tricomas glandulares, como *Byrsonima variabilis* (DC.) e *E. erythropappus*, essas estruturas
317 foram observadas plasmolisadas e rompidas (Gomes *et al.*, 2021). A perda de turgidez dos
318 tricomas glandulares também foi relatada por Anjos *et al.* (2018). Modificações nas células
319 epidérmicas foram observadas em *B. basiloba*, reconhecida como bom bioindicador desse
320 poluente (Rodrigues *et al.*, 2018b).

321 Rossi *et al.* (2016) apontam que a densidade de tricomas pode atuar como barreira
322 adicional aos efeitos danosos do flúor em *Vitex polygama* Cham., embora essa proteção só se
323 manifeste após o desenvolvimento completo dos tricomas. Tricomas imaturos, dependendo
324 das características de suas paredes celulares, podem reter flúor em solução (Pires, 2010; Li *et*
325 *al.*, 2025). Em *S. auriculata*, tricomas destruídos evidenciaram que os danos se estenderam às
326 camadas superficiais do mesofilo (Peixoto *et al.*, 2005). A natureza hidrofóbica da porção

327 distal dos tricomas pode conferir proteção contra poluentes fitotóxicos dissolvidos. Uma
328 relação entre comprimento/densidade de tricomas e resistência aos poluentes foi proposta por
329 Garg e Varshney (1980), e verificada em *E. erythropappus* durante exposição ao flúor (Pires,
330 2010), sugerindo que a exposição pode induzir o aumento do comprimento dos tricomas.

331 Os tricomas são estruturas epidérmicas que possuem valor taxonômico para muitos
332 táxons e sua avaliação anatômica sob estresse pode indicar os efeitos sobre caracteres
333 conservativos (Pires, 2010). Espécies com tricomas adaptados à absorção de água
334 atmosférica, como os “trichome-like” descritos por Vitarelli *et al.* (2016), devem ser
335 analisadas quanto ao possível direcionamento do ânion fluoreto aos tecidos do mesofilo.

336 Estômatos são o principal ponto de entrada do flúor gasoso (Rodrigues *et al.*, 2018a;
337 Anjos *et al.*, 2018; Gomes *et al.*, 2021, 2025). As células estomáticas são, portanto, as
338 primeiras a sofrer com o poluente (Pita-Barbosa *et al.*, 2009). Em espécies anfiestomáticas,
339 como *Spondias purpurea* L., os danos são intensificados, com degradação dos ostíolos e
340 danos no mesofilo (Anjos *et al.*, 2018). Espécies com cutícula espessa e ceras epicuticulares,
341 como *B. variabilis* e *E. erythropappus*, mostram maior comprometimento nas regiões com
342 estômatos (Gomes *et al.*, 2021).

343 No mesofilo, os danos causados pelo flúor são visíveis por microscopia óptica:
344 alterações na parede celular, perda de turgidez, retração dos protoplastos e morte celular
345 necrótica (Sant’Anna-Santos *et al.*, 2007; Pires, 2010; Rossi *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*,
346 2017; Anjos *et al.*, 2018; Rodrigues *et al.*, 2018a; Sant’Anna-Santos *et al.*, 2019; Rodrigues *et*
347 *al.*, 2020; Gomes *et al.*, 2021).

348 Rodrigues *et al.* (2020) relatam que, em *S. mombin*, o aumento da concentração de
349 flúor promoveu danos tão intensos que inviabilizaram a distinção das camadas epidérmica e
350 do mesofilo, que também apresentou redução de espessura. Resposta semelhante foi

351 observada em *Joannesia princeps* Vell. (Sant'Anna-Santos; Azevedo, 2007). Em *E.*
352 *erythropappus*, folhas formadas durante a exposição apresentaram células do mesofilo
353 incompletamente desenvolvidas, ausência de diferenciação entre parênquima paliçádico e
354 lacunoso, além de hiperplasia e redução dos espaços intercelulares (Pires, 2010). Em *B.*
355 *basiloba*, pigmentação avermelhada associada à presença de antocianinas foi registrada como
356 resposta ao aumento da aplicação de flúor (Rodrigues *et al.*, 2018b).

357 A parede celular, em contato com os espaços intercelulares, encontra-se umedecida
358 por água movida através das microfibrilas de celulose e outros componentes hidrofílicos (Taiz
359 *et al.*, 2017). Esse ambiente pode favorecer a solubilização do flúor gasoso, o que explicaria
360 sua penetração e efeitos nas paredes celulares. O flúor pode atingir a membrana plasmática,
361 interferindo na organização da bicamada lipídica, ligando-se às porções proteicas, alterando
362 funções metabólicas e seletividade da membrana (Miller, 1993; Fornasiero, 2001;
363 Kamaluddin, 2003; Weinstein; Davison, 2003; Oliva; Figueiredo, 2005; Gomes *et al.*, 2021;
364 Li *et al.*, 2025).

365 Sabe-se que o flúor pode afetar a síntese de componentes estruturais das membranas e
366 promover a hidrólise de lipídios da bicamada (Bhatnagar; Bhatnagar, 2000). A sensibilidade
367 do tonoplasto ao flúor (Miller, 1993; Panda, 2015; Rodrigues *et al.*, 2017) está relacionada à
368 morte celular, devido à liberação de compostos fenólicos e outras substâncias osmoticamente
369 ativas. A presença de numerosos pequenos vacúolos em *V. polygama* foi atribuída à
370 degradação do tonoplasto (Rossi *et al.*, 2016).

371 A produção de compostos fenólicos é frequentemente registrada em plantas expostas
372 ao flúor (Silva *et al.*, 2000; Sant'Anna-Santos *et al.*, 2007; Rossi *et al.*, 2016; Chahine *et al.*,
373 2023), atuando como resposta defensiva à infecção por patógenos (Buchanan *et al.*, 2015),

374 como observado em *S. purpurea*, onde o desgaste cuticular precedeu a colonização por hifas
375 (Anjos *et al.*, 2018).

376 Algumas espécies apresentam tolerância ao flúor, sem alterações histológicas ou
377 fisiológicas evidentes (Mesquita *et al.*, 2011; Baunthiyal; Sharma, 2014). Entre elas,
378 *Hancornia speciosa* Gomes. destacou-se por não apresentar danos, embora tenha produzido
379 compostos fenólicos (Carvalho Silva *et al.*, 2020). Nessa espécie, não foram observados
380 patógenos, indicando que o acúmulo desses compostos reflete estresse oxidativo induzido
381 pelo fluoreto (Louback *et al.*, 2016). A compreensão das estratégias adotadas por plantas
382 tolerantes ainda é incipiente. Características edáficas, como maior disponibilidade de cálcio e
383 magnésio, podem reduzir necroses (Zouari *et al.*, 2017; Carvalho Silva *et al.*, 2020). A
384 adsorção do flúor na parede celular e sua imobilização vacuolar são mecanismos eficazes na
385 mitigação de danos (Peng *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2025). Assim, *H. speciosa* pode ser
386 considerada modelo promissor para estudos futuros, especialmente em contextos edáficos
387 típicos do Cerrado. Estudos de biomonitoramento ativo e passivo podem ampliar os dados
388 obtidos por Carvalho Silva *et al.* (2020) e esclarecer os mecanismos de tolerância em plantas
389 expostas ao flúor.

390

391 **Alterações morfológicas**

392 Injúrias como cloroses e necroses são relatadas na literatura como possíveis alterações
393 morfológicas em plantas afetadas pelo flúor (F) atmosférico. Em alguns casos, danos visuais
394 não são observados e ainda assim o flúor é indicado como agente estressor, capaz de
395 modificar ou degradar tecidos (Gomes *et al.*, 2021). O estudo de plantas afetadas por flúor,
396 sem sintomas visuais, é de importante valor prognóstico para proposição de possíveis espécies
397 bioindicadoras, visto que as alterações anatômicas e fisiológicas podem servir como

398 biomarcadores em espécies não afetadas visualmente, explicitando os efeitos que este
399 poluente causa, mesmo que a planta não apresente características externas específicas a este
400 agente estressor (Rodrigues *et al.*, 2018).

401 • **Valor prognóstico**

402 Pereira (2013), com o objetivo de selecionar características morfofisiológicas
403 relacionadas ao agente estressor, avaliou os efeitos de simulação de chuva fluoretada por 15
404 minutos durante 10 dias consecutivos com *P. cauliflora* e *C. vernalis*. As plantas foram
405 submetidas a chuvas simuladas contendo 0, 10, 15 e 20 mg L⁻¹ de fluoreto de potássio
406 (KF), em diferentes períodos do ano. Observando as alterações morfológicas, apenas *C.*
407 *vernalis* apresentou cloroses em simulação de chuva com flúor nas concentrações de 15 e 20
408 mg L⁻¹ de KF, enquanto *P. cauliflora* não apresentou injúrias foliares a olho nu em nenhum dos
409 tratamentos submetidos. Entretanto, quando ambas as espécies foram comparadas ao controle,
410 foi possível identificar a nível de ultraestrutura, modificações na superfície foliar, incluindo
411 erosão, acúmulo de ceras epicuticulares e colonização por hifas fúngicas. É possível concluir
412 que as espécies *P. cauliflora* e *C. vernalis* são espécies potencialmente bioacumuladoras que
413 podem ser utilizadas para identificar a presença de flúor na atmosfera, sendo a espécie *P.*
414 *cauliflora* promissora para avaliações diagnósticas e prognósticas em áreas impactadas por
415 esse tipo de poluição, já que apesar de não ser visualmente afetada foram encontradas
416 alterações ultraestruturais em todos os tratamentos.

417 Gomes *et al.* (2021), avaliaram através de biomonitoramento passivo o efeito da
418 emissão do flúor em três espécies endêmicas do Brasil: *Myrceugenia alpigena* (DC.) Ladrum
419 (*Myrtaceae*), *B. variabilis* e *E. erythropappus*. Os ramos monitorados não apresentaram danos
420 visuais (clorose e necrose) durante todo o período monitorado, mas acumularam poluentes e
421 apresentaram danos microscópicos; um padrão verificado anteriormente por Mondal (2017).

422 Gomes *et al.* (2021) observaram que as espécies monitoradas não apresentavam sintomas
423 visuais, mas apresentavam níveis consideráveis de flúor e alterações anatômicas. A partir
424 dessa informação, é possível inferir que a variação da suscetibilidade das espécies está
425 relacionada à resposta específica de cada organismo ao poluente e não a um limite de
426 concentração de flúor nas plantas. As respostas obtidas através do biomonitoramento passivo
427 demonstram que *M. alpigena* apesar de não apresentar sintomatologia visual foi a espécie
428 mais afetada, sendo apontada como uma espécie com alto potencial no monitoramento de
429 ambientes poluídos por flúor. Entretanto, os autores sugerem a realização de análises em
430 ambientes controlados para confirmação dos danos observados em campo.

431 Ao estudar os efeitos de chuva simulada com o poluente em concentrações de 0, 10,
432 20 e 30 mg L⁻¹ KF por 30 dias em *B. basiloba*, Rodrigues *et al.* (2018b) observaram que as
433 folhas submetidas à chuva produziram manchas avermelhadas na superfície foliar já na menor
434 concentração de KF (10 mg L⁻¹). Resultados semelhantes foram encontrados por Paula *et al.*
435 (2005) que identificou em *Byrsonima crassifolia* (L.) Rich o mesmo padrão de manchas
436 avermelhadas. Sant'Anna-Santos *et al.* (2014) evidencia a associação entre sintomas
437 macroscópicos e microscópicos, em que análises microscópicas têm importante papel
438 prognóstico sendo que ao fazer essa correlação entre sintomas visuais, anatômicos e
439 fisiológicos é possível propor biomarcadores dos efeitos de KF em outras espécies nativas.

440 Rodrigues *et al.* (2018a) submeteram *Sapindus saponaria* L. à exposição por chuva
441 simulada com diferentes concentrações de fluoreto de potássio (0, 10, 20, 30 e 40 mg L⁻¹)
442 durante 19 dias e, como resultado, foi observado um dano gradual na superfície foliar, de
443 acordo com o tempo e a concentração do poluente. As folhas apresentaram cloroses e
444 necroses, sintomas estes, que progrediram a uma despigmentação foliar. Após poucos dias (4
445 dias de exposição) a espécie estudada já demonstrava efeitos nas menores doses utilizadas. *S.*

446 *saponaria* foi afetada pelo tratamento com flúor em todas as doses testadas, assim, mostrou
447 susceptibilidade, tendo alto potencial para ser utilizada como bioindicadora em programas de
448 recuperação de áreas degradadas e programas de monitoramento de arborização, segundo os
449 autores.

450 O estudo de Rodrigues *et al.* (2017) teve como objetivo investigar, por meio da
451 caracterização dos efeitos do KF, o potencial de *E. dysenterica* como espécie bioindicadora
452 em ambientes contaminados com flúor. Em chuva simulada, foram usadas as concentrações
453 de 0, 10, 20 e 30 mg L⁻¹ de KF, por um período de 27 dias. *E. dysenterica* apresentou
454 cloroses e necroses acentuadas e progressivas, de acordo com o aumento da dose do poluente.
455 É possível pensar biomarcadores para efeitos de KF em espécies nativas, a partir dos
456 resultados visuais, anatômicos e fisiológicos em *E. dysenterica*. Essa avaliação integrada pode
457 auxiliar na seleção de espécies bioindicadoras, utilizadas em programas de biomonitoramento
458 do poluente.

459 Sant'Anna-Santos *et al.* (2007) estudou a espécie nativa *Magnolia ovata* (A. St.-Hil.)
460 SPRENG. com o intuito de avaliar o grau de suscetibilidade e caracterizar as injúrias, através
461 de parâmetros morfológicos e anatômicos, contribuindo com informações sobre a
462 sensibilidade da espécie. Mudanças foram submetidas à chuva simulada com flúor (10 µg.ml⁻¹ de
463 flúor) por 10 dias consecutivos. As folhas da espécie estudada apresentaram poucos danos
464 visuais em comparação ao controle. Entretanto, as análises de ultraestrutura, realizadas
465 anteriormente ao aparecimento de danos, explicitam a importância de análises microscópicas
466 no diagnóstico precoce da injúria. Os sintomas verificados em folhas de *M. ovata* foram
467 semelhantes aos observados por Silva *et al.* (2000) nas espécies estudadas. Desta forma, *M.*
468 *ovata*, ao apresentar pouca sintomatologia visual e respostas amenas, possui potencial para ser
469 utilizada como biossensor em programas de bioindicação (De Temmerman *et al.*, 2004).

470 Sant'Anna-Santos *et al.* (2019) traz à tona uma importante discussão sobre
471 sintomatologia, onde diz que os sintomas visuais só aparecem em altas concentrações ou em
472 situações de longos períodos de exposição ao flúor atmosféricos. Dessa forma, são
473 necessárias análises em que todos os parâmetros sejam avaliados conjuntamente, usando
474 biomarcadores mais específicos que as alterações visuais na planta, para uma identificação
475 mais precisa e precoce do estresse provocado pelo poluente (Sant'Anna-Santos *et al.*, 2012;).
476 Em *Vitex polygama* Cham. não foram observados sintomas visuais quando exposto ao
477 fluoreto de potássio, sendo que o acúmulo do poluente foi relativamente baixo, ocorrendo
478 apenas nas maiores concentrações de fluoreto de potássio (Rossi, 2016). As alterações
479 detectadas nas análises microscópicas em *V. polygama*, com aspecto visual saudável, são de
480 grande valor prognóstico na detecção de injúrias por flúor e podem ser utilizadas como
481 biomarcadores em programas de monitoramento de poluição atmosférica por flúor.

482 **Biomonitoramento**

483 No biomonitoramento ativo, Furlan *et al.* (2007) demonstraram que mudas de
484 *Tibouchina pulchra* (Desr.) D. Don. apresentaram menor crescimento e alocação de biomassa
485 quando expostas a ambientes contaminados por flúor, sendo o inverno o período de maior
486 impacto. Espécies como *S. auriculata*, *V. polygama* e *Bixa orellana* L. também têm se
487 mostrado sensíveis à exposição experimental ao flúor, revelando alterações estruturais, como
488 danos ao tonoplasto, retração de protoplastos e desorganização do mesofilo, mesmo sem
489 sintomas visíveis de toxicidade (Pires, 2010; Rossi *et al.*, 2016; Gomes *et al.*, 2021).

490 No biomonitoramento passivo, Paula *et al.* (2005) identificaram efeitos fisiológicos
491 significativos em *B. crassifolia* próxima a uma fonte emissora de F, como a redução nos
492 teores de carboidratos e proteínas solúveis, além da clorofila *a*. Outros estudos destacam a
493 presença de F acumulado em *Eucalyptus rostrata* Schl., *Populus hybridus* L. e *Pinus radiata*

494 D.Don em áreas industriais (Rodriguez *et al.*, 2012), bem como alterações na fotossíntese em
495 gramíneas forrageiras expostas (Divan Junior *et al.*, 2007).

496 Essas respostas podem ser complementadas por alterações bioquímicas, como a
497 ativação de enzimas antioxidantes (superóxido dismutase, peroxidase) e o acúmulo de
498 compostos fenólicos, que reforçam a viabilidade de biomarcadores fisiológicos no
499 monitoramento da contaminação por flúor (Sant'Anna-Santos *et al.*, 2007; Chahine *et al.*,
500 2023).

501

502

503 **Conclusão**

504 Embora muitos estudos sobre os efeitos do flúor em plantas sejam conduzidos sob
505 condições controladas, pesquisas baseadas em biomonitoramento ativo ou passivo têm
506 revelado respostas mais próximas da realidade ambiental. Comparar dados obtidos em casa de
507 vegetação com os de campo pode fornecer uma compreensão mais precisa sobre a
508 fitotoxicidade do flúor. Dessa forma, o uso de plantas no biomonitoramento da poluição por
509 flúor se mostra promissor tanto para o diagnóstico precoce da contaminação quanto para a
510 seleção de espécies indicadoras.

511 Há uma lacuna significativa na investigação dos impactos do flúor sobre estruturas
512 secretoras, que exercem funções ecológicas essenciais, como atração de polinizadores, defesa
513 contra herbivoria e cicatrização. Alterações no desenvolvimento, na secreção ou na
514 composição do exsudado dessas estruturas podem comprometer interações ecológicas e a
515 sobrevivência das espécies. Do ponto de vista fisiológico, também é fundamental explorar os
516 efeitos do flúor sobre a regulação hormonal vegetal, dado seu papel nas respostas ao estresse
517 ambiental.

518 Além disso, é necessária uma avaliação mais sistemática que relacione a intensidade
519 dos danos com a concentração de flúor, contribuindo para políticas de preservação ambiental
520 e práticas sustentáveis em culturas de interesse econômico.

521 Portanto, investigações futuras devem priorizar análises anatômicas, fisiológicas e
522 bioquímicas em diferentes tipos de tecidos vegetais, especialmente estruturas secretoras, a fim
523 de gerar subsídios para políticas públicas e estratégias de conservação voltadas a ecossistemas
524 ameaçados pela ação antrópica.

525

526

527

528 Referências

529 Abdallah, F. B., Elloumi, N., Mezghani, I., Boukhris, M., Garrec, J. P. 2006. Survival
530 strategies of pomegranate and almond trees in a fluoride polluted area. *Comptes Rendus*
531 *Biologies*. 329, 200–207. doi: 10.1016/j.crv.2005.12.003. PMID: 16545762.

532 Achary, M. M. V., Patnaik, A. R., Panda, B. B. 2012. Oxidative biomarkers in leaf tissue of
533 barley seedlings in response to aluminium stress. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 75(1); 16–26. doi:
534 10.1016/j.ecoenv.2011.08.015. PMID: 21899888.

535 Ahmad, M.N., Zia, A., van den Berg, L., Ahmad, Y., Mahmood, R., Dawar, K.M., *et al.* 2022.
536 Effects of soil fluoride pollution on wheat growth and biomass production, leaf injury index,
537 powdery mildew infestation and trace metal uptake. *Environ Pollut.* Apr 1;298:118820. doi:
538 10.1016/j.envpol.2022.118820. PMID: 35007676.

539 Anjos, T.B.O., Louback, E., Azevedo, A.A., Silva, L.C. 2018. Sensibility of *Spondias*
540 *purpurea* L. (Anacardiaceae) exposed to fluoride-simulated fog. *Ecol. Indic.* 90: 154–163.
541 doi:10.1016/j.ecolind.2018.03.005.

542 Baker, N. R., Rosenqvst, E. 2004. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop
543 production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*.
544 Lancaster, v. 55, p. 1607-1621. doi: 10.1093/jxb/erz535. PMID: 15258166

545 Barreiros, A. L. B. S., David, J. M., David, J. P. 2006. Estresse oxidativo: relação entre
546 gerações de espécies reativas e defesa do organismo. *Química Nova*. v. 29, n. 1, p. 113-
547 123. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000100021>

- 548 Baunthiyal, M., Ranghar, S. 2014. Physiological and biochemical responses of plants under
549 fluoride stress: an overview. *Fluoride*. 47: 287–293.
- 550 Baunthiyal M, Sharma V. 2014. Response of three semi-arid plant species to fluoride;
551 consequences for chlorophyll florescence. *Int J Phytoremediation*. 16(4):397-414. doi:
552 10.1080/15226514.2013.783790. PMID: 24912239.
- 553 Bhatnagar, M.; Bhatnagar, A. 2000. Algal and cyanobacterial responses to fluoride. *Fluoride*,
554 v. 33, p. 55–65.
- 555 Braen, S. N., Weinstein, L. H. 1985. Uptake of fluoride and aluminum by plants grown in
556 contaminated soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 24, 215–223.
- 557 Buchanan, B. B., Gruissem, W. 2015. *R. L. Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. 1.
558 ed. Rockville: American Society of Plant Biologists.
- 559 Carvalho Silva, T. A., Vasconcelos-Filho, S. C., Rodrigues, A. A., Rodrigues, D. A., Moura,
560 L. M. F., *et al.* 2020. Tolerance of *Hancornia speciosa* Gomes (Apocynaceae) to potassium
561 fluoride: physiological and anatomical traits. *Acta Physiol Plant* 42, 153.
562 <https://doi.org/10.1007/s11738-020-03144-7>
- 563 Chahine, S., Melito, S., Giannini, V. Seddaiu, G., Roggero, P. 2024. Fluoride stress affects
564 seed germination and seedling growth by altering the morpho-physiology of an African local
565 bean variety. *Plant Growth Regul* 102, 339–350. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-01064-3>
- 566 Chaudhary, N. 2022. Pollution biomarkers in environmental biomonitoring: an insight into air
567 pollution. In: *New paradigms in environmental biomonitoring using plants*. Elsevier, pp. 165–
568 180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824351-0.00009-2>
- 569 Choudhary, S., Rani, M., Singh, R., Prasad, S., Patra, A., Ogireddy, S. D. 2019. Impact of
570 fluoride on agriculture: A review on it's sources, toxicity in plants and mitigation strategies. 7.
571 1675-1680.
- 572 Das, K., Roychoudhury, A. 2014. Reactive oxygen species (ROS) and the response of
573 antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. *Front. Environ. Sci.*, 2;
574 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00053>
- 575 De Temmerman, L., Bell, N. B., Garrec, J. P., Klumpp, A., Krause, G. H. M., Tonneijck, A. E.
576 G.. 2004. Biomonitoring of air pollutants with plants – considerations for the future. In:
577 KLUMPP, A., ANSEL, W., KLUMPP, G. (Eds) *Urban air pollution, bioindication and*
578 *environmental awareness*. Göttingen: Cuvillier Verlag,. 392p.
- 579 Divan Junior, AM., Oliva, M.A., Martinez, C.A., Cambraia, J. 2007. Effects of fluoride
580 emissions on two tropical grasses: *Chloris gayana* and *Panicum maximum* cv. Colônia.
581 *Ecotoxicol Environ Saf. Jun;67(2):247-53*. doi: 10.1016/j.ecoenv.2006.06.002. PMID:
582 16876246.
- 583 Domingos, M., Klumpp, A., Rinaldi, M. C. S., Modesto, I. F., Klumpp, G., Delitti, W. B. C.
584 2003. Combined effects of air and soil pollution by fluoride emissions on *Tibouchina pulchra*
585 Cogn., at Cubatao, SE Brazil, and their relations with aluminium. *Plant Soil*. 249, 297-308.
586 <https://doi.org/10.1023/A:1022800225753>

- 587 Fan, J., Chen, K., Xu, J., ABM, K., Chen, Y., Chenc, L., *et al.* 2022. Physiological effects
588 induced by aluminium and fluoride stress in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb).
589 Ecotoxicology and Environmental Safety. V 231, 113192,
590 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113192>.
- 591 Fornasiero, R. B. 2001. Phytotoxic effects of fluorides. Plant Science. Limerick, v. 161, n. 5,
592 p. 979-985. DOI:10.1016/S0168-9452(01)00499-X
- 593 Furlan, C. M, Domingos, M, Salatino, A. 2007. Effects of initial climatic conditions on
594 growth and accumulation of fluoride and nitrogen in leaves of two tropical tree species
595 exposed to industrial air pollution. Sci Total Environ. 399-
596 407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.006>
- 597 Gadi, B. R., Kumar, R., Goswami, B., Rankawat, R., Rao, S. R. 2021. Recent Developments
598 in Understanding Fluoride Accumulation, Toxicity, and Tolerance Mechanisms in Plants: an
599 Overview. J Soil Sci Plant Nutr 21, 209–228. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00354-3>
- 600 Garg, K.K., Varshney, C.K. 1980. Effect of air pollution on the leaf epidermis at the
601 submicroscopic level. Experientia 36, 1364–1366. <https://doi.org/10.1007/BF01960100>
- 602 Gill, S. S., Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic
603 stress tolerance in crop plants. Plant Physiol Biochem. 48:909–930.
604 <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- 605 Gomes, T. F., Lima, A. M., Marques, A. P. P., Silva, L. C. 2021. Effects of fluoride emission
606 on the morphoanatomy of three plant species endemics to Brazil using passive biomonitoring.
607 Environ Sci Pollut Res. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13017-2>
- 608 Gomes, T.F., Rezende, F.P., Lima, A.M. Souza, G. A., Miranda, J. D. B., Barbosa, A. P., da
609 Silva, L. C. 2025. Morphoanatomical and metabolic changes in *Bixa orellana* L. (Bixaceae)
610 exposed to atmospheric fluorine. Environ Sci Pollut Res. 32, 9541–9554.
611 <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36293-8>
- 612 Greenwood, D. A. 1956. Some Effects of Inorganic Fluoride on Plants, Animals, and Man.
613 USU Faculty Honor Lectures. Paper 41. http://digitalcommons.usu.edu/honor_lectures/41.
- 614 Hasanuzzaman, M., Fujita, M. 2022. Plant Oxidative Stress: Biology, Physiology and
615 Mitigation. Plants, 11, 1185. <https://doi.org/10.3390/plants11091185>
- 616 Hossain, M. A., Bhattacharjee, S., Armin, S. M., Qian, P., Xin, W., Li, H. Y., Tran, L. S. P.
617 2015. Hydrogen peroxide priming modulates abiotic oxidative stress tolerance: Insights from
618 ROS detoxification and scavenging. Front. Plant Sci., 6(420); 1-19.
619 <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00420>
- 620 Kamaluddin, M., Zwiazek, J. J. 2003. Fluoride inhibits root water transport and affects leaf
621 expansion and gas exchange in aspen (*Populus tremuloides*) seedlings. Physiol Plant.
622 117:368–375. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.00040.x>
- 623 Kamiński, J., Stachelska-Wierzchowska, A., Michalczyk, D. J., Klimkowicz-Pawlas, A.,
624 Olkowska, E., Wolska, L., *et al.* 2024. Changes in Metabolism and Content of Chlorophyll in

- 625 Common Duckweed (*Lemna minor* L.) Caused by Environmental Contamination with
626 Fluorides. *Molecules*, 29, 2336. <https://doi.org/10.3390/molecules29102336>
- 627 Klumpp, A, Domingos, M, Klumpp, G. 1996. Assessment of the vegetation risk by fluoride
628 emissions from fertiliser industries at Cubatao, Brazil. *Sci Total Environ.* 192, 219–228
- 629 Kováčik, J., Klejdus, B., Hedbavny, J, Bačkor, M. 2010. Effect of copper and salicylic acid on
630 phenolic metabolites and free amino acids in *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyceae).
631 *Plant Sci.*, 178(3); 307–311. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.01.009>
- 632 Krasavtseva, E., Makarov, D. 2024. Changes in Morphometric and Physiological Parameters
633 of Oat (*Avena sativa* L.) Caused by Fluoride Contamination. *Int. J. Plant Biol.*, 15(4), 1277-
634 1287; <https://doi.org/10.3390/ijpb15040088>
- 635 Krause, G. H., Weis, E. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics.
636 *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Palo Alto, v. 42, p. 313-
637 349. DOI:10.1146/annurev.pp.42.060191.001525
- 638 Kumar, M., Bijo, A. J., Baghel, R. S., Reddy, C. R. K., Jha, B. 2012. Selenium and spermine
639 alleviate cadmium-induced toxicity in the red seaweed *Gracilaria dura* by regulating
640 antioxidants and DNA methylation. *Plant Physiol. Biochem.*, 51, 129-138. doi:
641 10.1016/j.plaphy.2011.10.016. PMID: 22153249.
- 642 Kumar, K., Giri, A., Vivek, P., Thiyagarajan, K. B. 2017. Effects of Fluoride on Respiration
643 and Photosynthesis in Plants: An Overview. *Annals of Environmental Science and*
644 *Toxicology.*, 2 (1): 043-047. DOI: 10.17352/aest.000011
- 645 Kumar, R., Sinha, R., Sharma, P.K., Ivy, N., Kumar, P., Kant, N., *et al.* 2021.
646 Bioaccumulation of Fluoride in Plants and Its Microbially Assisted Remediation: A Review
647 of Biological Processes and Technological Performance. 9, 2154.
648 <https://doi.org/10.3390/pr9122154>
- 649 Li, C., Xu, H., Xu, J., Luo, J., Li, P., Zhao, F. 2025. Research on the distribution, localization,
650 and morphology of fluorides in the cell walls of tea plant leaves. *Plant Metabolism and*
651 *Chemodiversity*, V16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1539883>
- 652 Louback, E., Pereira, T. A. R., de Souza, S. R., de Oliveira, J. A., Da Silva, L. C. 2016.
653 Vegetation damage in the vicinity of an aluminum smelter in Brazil. *Ecol Indic.* 67, 193–203.
654 <https://doi.org/10.1016/j.ecolond.2016.02.044>
- 655 Lüttge, U. *Physiological ecology of tropical plants*. New York: Springer, 2008. 458 p.
- 656 Markert, B. A., Breure, A. M., Zechmeister, H. G. 2003. Chapter 1: Definitions, strategies and
657 principles for bioindication/biomonitoring of the environment, Volume 6, Pages 3-39, ISSN
658 1875-1121, ISBN 9780080441771, [https://doi.org/10.1016/S0927-5215\(03\)80131-5](https://doi.org/10.1016/S0927-5215(03)80131-5).
- 659 McNulty, I. B.; Newman, D. W. 1961. Mechanism of fluoride induced chlorosis. *Plant*
660 *Physiology*, v. 36. no 4, p. 385 – 388. doi: 10.1104/pp.36.4.385

- 661 Mesquita, G. L., Machado, E. C., Machado, R., Cantarella, H., Mattos, D. 2013. Fluoride
662 Exposure Compromises Gas Exchange of Plants. American Journal of Plant Sciences. Vol. 4
663 No. 12C, 2013, pp. 16-20. doi: 10.4236/ajps.2013.412A3003.
- 664 Mesquita, G. L., Tanaka, F. A. O., Cantarella, H., Mattos, D. 2011. Atmospheric Absorption
665 of Fluoride by Cultivated Species. Leaf Structural Changes and Plant Growth. Water Air Soil
666 Pollut, 219, 143–156. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0694-4>
- 667 Miller, G. W. 1993. The effects of fluoride on higher plants – With special emphasis on early
668 physiological and biochemical disorder. Fluoride. 26:(1)3-22
- 669 Mondal N. K. 2017. Effect of fluoride on photosynthesis, growth and accumulation of four
670 widely cultivated rice (*Oryza sativa* L.) varieties in India. Ecotox Environ Safety 144:36–44.
671 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.009>
- 672 Oliva, M. A., Figueiredo, G. D. E., Nees, S., Stapf, N. 2005. Gramíneas bioindicadoras da
673 presença de flúor em regiões tropicais. Pesqui Agropecuária Bras 1:389–397.
674 <https://doi.org/10.1590/S0100-84042005000200017>
- 675 Oliveira, M. C., Schoffen, J. P. F. 2010. Oxidative stress action in cellular aging. Brazilian
676 Archives of Biology and Technology, v. 53, n. 6, p. 1333-1342.
677 <https://doi.org/10.1590/S1516-89132010000600009>
- 678 Panda, D. Fluoride toxicity stress: physiological and biochemical consequences on plants.
679 2015. International Journal of BioResearch and Environmental Agricultural Science, v. 1, n. 1,
680 p. 70–84.
- 681 Paula, M. T., Filho, B. G. S., Santos, D. S. B., Vieira, I. M. S., Conceição, H. E. O. 2005.
682 Influência do flúor sobre parâmetros químicos e bioquímicos de folhas de murici (*Byrsonima*
683 *crassifolia* L. Rich). Rev. Ciênc. Agrár, Belém. 43, 137–148.
- 684 Peixoto, P. H. P., Pimenta, D. S., Antunes, F. 2005. Efeitos do flúor em folhas de plantas
685 aquáticas de *Salvinia auriculata*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v, 40. 727-734.
686 <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000800001>
- 687 Pelc, J., Śnioszek, M., Wróbel, J., Telesinki, A. J. Effect of fluoride on germination, early
688 growth and antioxidant enzyme activities of three winter wheat (*Triticum aestivum* L.)
689 cultivars. Applied Sciences, v. 10, n. 19, art. 6971, 2020. doi:10.3390/app10196971
- 690 Peng, A., Yu, K., Yu, S., Li, Y., Zuo, H., Li, P., *et al.* 2023. Aluminum and Fluoride Stresses
691 Altered Organic Acid and Secondary Metabolism in Tea (*Camellia sinensis*) Plants:
692 Influences on Plant Tolerance, Tea Quality and Safety. Int. J. Mol. Sci., 24, 4640.
693 <https://doi.org/10.3390/ijms24054640>
- 694 Peng, C. Y., Xu, X. F., Ren, Y. F., Niu, H., Yang, Y. Q., Hou, R., *et al.* 2021, Fluoride
695 absorption, transportation and tolerance mechanism in *Camellia sinensis*, and its
696 bioavailability and health risk assessment: a systematic review. J Sci Food Agric, 101: 379-
697 387. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10640>

- 698 Pereira, G. C. 2013. Seleção de características morfofisiológicas no biomonitoramento das
699 chuvas ácida ou fluoretada em duas espécies arbóreas. Tese (Doutorado em Ecologia
700 Aplicada) - [Universidade Federal de Lavras](#)
- 701 Pires, T. P. 2010. Efeitos do flúor sobre a fotossíntese e estrutura foliar de
702 *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish (Asteraceae). Dissertação (Mestrado em
703 Botânica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- 704 Pita-Barbosa, A., Sant’Anna-santos, B. F., Silva, K. L. F., Azevedo, A. A., Rocha, D. I. 2009.
705 Efeitos fitotóxicos do fluoreto na morfoanatomia foliar de *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A.
706 Rich.) Stapf e *Brachiaria decumbens* Stapf (Poaceae). *Acta Bot Bras.* 23, 1027-1033
707 <https://doi.org/10.1590/S0102-33062009000400012>
- 708 Ribeiro, R. V. 2009. Photosynthesis and water relations of well-watered orange plants as
709 affected by winter and summer conditions. *Photosynthetica*, Prague, v. 47, n. 2, p. 215-222.
710 DOI: 10.1007/s11099-009-0035-2
- 711 Ribeiro, S. F. C. 2008. Efeitos da aplicação de flúor sobre os processos fotossintéticos de três
712 espécies lenhosas e nativas da região de Ouro Preto - MG. 63 f. Dissertação (Mestrado em
713 Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG
- 714 Rhimi, N., Mezghani, I., Elloumi, N., Nasri, M., Ben, Abdallaha, F. 2016. Morphological and
715 anatomical responses of pear and almond trees to fluoride air pollution. *Fluoride.* 49, 5-8
- 716 Rodrigues, A. A., Filho, S. C. V., Mendes, G. C., Rehn, L. S., Rodrigues, D. A., Rodrigues, C.
717 L., *et al.* 2017. Fluoride in simulated rain affects the morfoanatomy and physiology of
718 *Eugenia dysenterica* (Mart.) DC, *Ecological Indicators*, Volume 82, Pages 189-195, ISSN
719 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.005>.
- 720 Rodrigues, A. A., Filho, S. C. V., Müller, C., Rodrigues, D. A., Mendes, G. C., Rehn, L. S., *et*
721 *al.* 2018a. *Sapindus saponaria* bioindicator potential concerning potassium fluoride exposure
722 by simulated rainfall: Anatomical and physiological traits, *Ecological Indicators*, Volume 89,
723 Pages 552-558, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.043>.
- 724 Rodrigues, D. A., Filho, S. C. V., Rodrigues, A. A., Müller, C., Farnese, F. S., Costa, A. C., *et*
725 *al.* 2018b. *Byrsonima basiloba* as a bioindicator of simulated air pollutants:
726 Morphoanatomical and physiological changes in response to potassium fluoride, *Ecological*
727 *Indicators*, Volume 89, Pages 301-308, ISSN 1470-160X,
728 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.019>.
- 729 Rodrigues, A. A., Rodrigues, A. D., Sales, F. J., Filho, C. V. S., Costa, C. A., Rodrigues, L.
730 C., *et al.* 2022. Morphoanatomical, Physiological, and Biochemical Indicators in *Lactuca*
731 *sativa* L. Germination and Growth in Response to Fluoride. *Plants*, 11, 3406.
732 <https://doi.org/10.3390/plants11233406>
- 733 Rodriguez, J. H., Flores, M. L., & Alegría, J. G. (2012). Fluoride biomonitoring using tree
734 leaves in the vicinity of an aluminum smelter in Patagonia, Argentina. *Ecotoxicology and*
735 *Environmental Safety*, 80, 48–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.02.017>

- 736 Rossi, Z. T. T. Características ecofisiológicas, anatômicas e ultraestrutura de *Vitex polygama*
737 Cham. (Verbenaceae) submetida à diferentes concentrações de flúor. 2012. 91 p. Dissertação
738 (Mestrado em Ecologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- 739 Sant'Anna-Santos, B. F.; Azevedo, A. A.; Alves, T. G.; Campos, N. V.; Oliva, M. A.;
740 Valente, V. M. M.; 2014. Effects of emissions from an aluminium smelter in a tree tropical
741 species sensitive to fluoride. Water Air Soil Pollut. 225, 1817. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1817-5>.
742
- 743 Sant'Anna-Santos, B. F.; Azevedo, A. A.; Oliva, M. A.; Campos, N.V.; Gomes, M.P. 2019.
744 What precedes fluoride-response symptomatology: Microscopic or physiological damage?,
745 Ecological Indicators, Volume 107, 105560, ISSN 1470-160X,
746 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105560>.
- 747 Sant'Anna-Santos, B. F., Azevedo, A. A., Silva, L. C., Oliva, M. A. 2012. Diagnostic and
748 prognostic characteristics of phytotoxicity caused by fluoride on *Spondias dulcis* Forst. F.
749 (Anacardiaceae). Anais da Acad Brasil de Ciências. 84, 689–702.
750 <https://doi.org/10.1590/S0001-37652012005000048>
- 751 Sant'Anna-Santos, B. F.; Duque-Brasil, R.; Azevedo A. A.; Silveira, A. S.; Araújo, J. M.;
752 Aguiar, R. 2007. Utilização de parâmetros morfoanatômicos na análise da fitotoxidez do flúor
753 em folhas de *Magnolia ovata* (A. St.-Hil.) Spreng. (Magnoliaceae). Rev. Árvore, Viçosa, v.
754 31, n. 4, p. 761-771, Aug. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000400022>.
- 755 Scandalios, J.G. 1993. Oxygen stress and superoxide dismutases. Plant Physiology, v.101,
756 p.7-12. doi: 10.1104/pp.101.1.7
- 757
- 758 Sen, A., Khan, I., Kundu, D., Das, K., Datta, J. K. 2017. Ecophysiological evaluation of tree
759 species for biomonitoring of air quality and identification of air pollution-tolerant species.
760 Environ. Monit. Assess., 189(262); 1-15. DOI: 10.1007/s10661-017-5955-x
- 761 Shan, Y., Feng, Z., Izuta, T., Aoki, M., Totsuka, T. 1995. The individual and combined
762 effects of ozone and simulated acid-rain on chlorophyll contents, carbon allocation and
763 biomass accumulation of armand pine seedlings. Water, Air and Soil Pollution, Dordrecht, v.
764 85, p. 1399-1404. doi: 10.1016/0269-7491(95)00039-9
- 765 Sharma, R., Kaur, R. 2018. Insights into fluoride-induced oxidative stress and antioxidant
766 defences in plants. Acta Physiol Plant 40, 181. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2754-0>
- 767 Sheng, H., Zeng, J., Yan, F., Wang, X., Wang, Y., Kang, H. *et al.* 2015. Effect of exogenous
768 salicylic acid on manganese toxicity, mineral nutrients translocation and antioxidative system
769 in polish wheat (*Triticum polonicum* L.). Acta Physiologiae Plantarum. 37. 10.1007/s11738-
770 015-1783-1.
- 771 Silva, E. N., Ribeiro, R. V., Ferreira-Silva, S. L., Viégas, R. A., Silveira, J. A. G. 2011. Salt
772 stress induced damages on the photosynthesis of physic nut young plants. Scientia Agricola,
773 Piracicaba, v. 68, n. 1, p. 62-68. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000100010>

- 774 Silva, L. C., Azevedo, A. A., Silva, E. A. M., Oliva, M. A. 2000. Flúor em chuva simulada:
775 sintomatologia e efeitos sobre a estrutura foliar e o crescimento de plantas arbóreas. Rev Bras
776 Bot 23:385–393. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042000000400004>
- 777 Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., Mansfield, T. 2017. Fisiologia Vegetal. 6. ed. Porto Alegre:
778 Artmed, p. 229-230
- 779 Treshow, M.; Anderson, F. K. 1989. Plant stress from air pollution. John Wiley and Sons Ltd,
780 Chichester.
- 781 Valko, M., Morris, H., Cronin, M.T. 2005. Metals, toxicity and oxidative stress. Curr Med
782 Chem.12(10):1161-208. doi: 10.2174/0929867053764635. PMID: 15892631.
- 783 Wang, P., Liu, W., Han, C., Wang, S., Bai, M., Song, C. 2024. Reactive oxygen species:
784 multidimensional regulators of plant adaptation to abiotic stress and development. Journal of
785 Integrative Plant Biology, v. 66, n. 3, p. 321–337,. <https://doi.org/10.1111/jipb.13601>.
- 786 Weinstein, L. H., Davison, A. W. 2003. Native plant species suitable as bioindicators and
787 biomonitors for airborne fluoride. Environmental Pollution. 125, 3–11
- 788 Weinstein, L. H; Davison, A. W. 2004 Fluorides in the environment: effects on plants and
789 animals. CABI Publishing, Oxford, p 287.
- 790 Yang, J., Liu, C., Li, J., Zhang, Y., Zhu, C., Gu, D., *et al.* 2024. Critical review of fluoride in
791 tea plants (*Camellia sinensis*): absorption, transportation, tolerance mechanisms, and
792 defluorination measures. Beverage Plant Research 4: e019 doi: 10.48130/bpr-0024-0010
- 793 Zhao, Y., Anne N. M, Nichol, C. 2022. Biomonitoring and assessment of airborne fluoride
794 using *Lolium perenne* near a phosphate fertilizer production facility, Science of The Total
795 Environment, V 815, 152517, ISSN 0048-9697,
796 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152517>.
- 797 Zouari, M., Elloumi, N., Bellassoued, K., Ben Ahmed, C., Krayem, M., Delmail, D., *et al.*
798 2017. Enzymatic antioxidant responses and mineral status in roots and leaves of olive plants
799 subjected to fluoride stress. S Afr J Bot. 111, 44–49.
800 <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2017.03.039>