

AVALIAÇÃO DE PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS EM PLANTAS DE SOJA SUBMETIDAS A PERÍODO DE ALAGAMENTO E REOXIGENAÇÃO, CULTIVADAS SOB TRATAMENTOS COM POTENCIAL MITIGADOR DO ESTRESSE HIPÓXICO

ANDREI NUNES RODRIGUES¹; ADRIANO UDICH BESTER²; DOUGLAS ANTÔNIO POSSO³; EDUARDO PEREIRA SHIMOIA⁴; LUCIANO DO AMARANTE⁵

¹Universidade Federal de Pelotas – andreinunes6700@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – adriano.udich.bester@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas – douglasposso@hotmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas – eduardopshimoia@gmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas – lucianoamarante@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas intensificadas pelo aquecimento global têm provocado eventos extremos, de secas severas a alagamentos cada vez mais frequentes (Rahmani et al., 2024). Estima-se que 17 milhões de km² de terras agrícolas sejam afetadas por alagamentos, principalmente em solos de baixa drenagem (Konnerup et al., 2018). Esse estresse ocorre quando a água ocupa os poros do solo, reduzindo a disponibilidade de oxigênio (O₂), o que compromete a respiração e o desenvolvimento radicular (Voesenek et al., 2016). O alagamento é um causador de perdas de produtividade, sobretudo nos estágios vegetativos e reprodutivos, com impactos diretos na economia (Da Silva & Do Amarante, 2020). De modo geral, os estresses climáticos reduzem a produtividade agrícola e ameaçam a segurança alimentar mundial (Shimono et al., 2012).

O Brasil lidera a produção global de soja, com 169 milhões de toneladas na safra 24/25, representando 40,2% do total mundial (USDA, 2025). A cultura destaca-se pela associação simbiótica com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, capazes de fixar N₂ atmosférico, reduzindo a necessidade de adubação nitrogenada e favorecendo maior acúmulo de biomassa em relação a plantas não inoculadas. Estratégias como a coinoculação com bactérias promotoras de crescimento, como *Azospirillum*, têm demonstrado ganhos adicionais na tolerância a estresses abióticos, incluindo o alagamento (Shimoia et al., 2024). Além disso, estudos apontam que o nitrato (NO₃⁻) pode aumentar a tolerância ao estresse hipóxico e auxiliar na recuperação após a drenagem do solo (Da Silva et al., 2020).

Durante o alagamento, a deficiência nutricional leva à senescência foliar e à degradação de pigmentos fotossintéticos, seja pela ação de espécies reativas de oxigênio (ROS) nos cloroplastos ou pela redução da fixação biológica de N₂ (Liu et al., 2023). Diante disso, este estudo buscou avaliar os teores de pigmentos fotossintéticos em plantas de soja coinoculadas com *Azospirillum* e cultivadas com suprimento de NO₃⁻, submetidas a alagamento e reoxigenação, a fim de investigar o potencial mitigador desses tratamentos frente ao estresse hipóxico.

2. METODOLOGIA

Utilizou-se sementes de soja [*Glycine max* (L.) Merril] cultivar NEXUS Brasmax, as quais foram semeadas em vasos de 1L contendo vermiculita esterilizada como substrato, e as plantas obtidas, foram cultivadas em casa de

vegetação. A nutrição das plantas foi realizada com solução nutritiva de Hoagland (Hoagland & Arnon, 1950). Na solução contendo nitrogênio, o mesmo foi disponibilizado na forma de nitrato. O experimento foi conduzido de forma inteiramente casualizado em esquema fatorial (3 x 2; fontes de N e níveis de estresse, respectivamente) com quatro repetições, cada unidade experimental foi constituída de um vaso contendo uma planta. Foram conduzidos três tratamentos: 1) Plantas inoculadas com *Bradyrhizobium* (*Bradyrhizobium japonicum* estirpes SEMIA 5079 e 5080, com 8×10^9 UFC/g), cultivadas na ausência de N mineral; 2) Plantas coinoculadas com *Bradyrhizobium* e *Azospirillum brasilense* (cepas Ab-v5 e Ab-v6 com 2×10^9 UFC/mL), cultivadas na ausência de N mineral e 3) Plantas inoculadas com *Bradyrhizobium*, cultivadas na presença de N mineral fornecido na forma de nitrato (2,5 mM). Ao atingirem o estágio fenológico R5, as plantas foram submetidas ao alagamento dispostas dentro de vasos grandes sem furos e preenchidos com solução nutritiva por oito dias. Após esse período, os vasos foram submetidos à drenagem por quatro dias. Foram realizadas duas avaliações, uma ao final do período de alagamento e outra ao final do período de drenagem. Nestes períodos foram coletadas amostras do quinto trifólio totalmente expandido. As determinações de clorofila total e carotenoides foram realizadas conforme metodologia de Wellburn (1994). Os dados foram analisados por ANOVA e as médias foram comparadas pelo teste Tukey ao nível de probabilidade de 0,5%. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software RBio e as figuras confeccionadas por meio do programa Excel 365.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As plantas controle coinoculadas apresentaram maiores teores de clorofila total durante o alagamento em relação às plantas controle nutridas com NO_3^- . No entanto, houve um decréscimo expressivo desses pigmentos nas plantas alagadas inoculadas e coinoculadas em relação aos seus respectivos controles, resultando em concentrações menores do que as plantas alagadas que receberam NO_3^- .

Com a reoxigenação, os teores de clorofila total permaneceram reduzidos nas plantas inoculadas com *Bradyrhizobium* sendo inferiores às plantas do tratamento AZOS e NITRATO, os quais recuperaram os teores de clorofilas aos níveis das plantas controle.

Os teores de carotenoides em plantas inoculadas e coinoculadas diminuíram durante o alagamento e em comparação com as plantas que receberam NO_3^- . Porém no período de reoxigenação, as plantas coinoculadas não tiveram diferença estatística das plantas que receberam nitrato. Nas plantas do tratamento BRAD, o teor de carotenoides manteve-se inferior ao respectivo controle e às plantas do tratamento AZOS em recuperação.

Durante o período de alagamento, a planta sinaliza esse estresse e produz espécies reativas de oxigênio. No entanto, com a intensificação do período de alagamento, há uma superredução do sistema de transporte de elétrons, que intensifica a produção de espécies reativas de oxigênio levando à na degradação das membranas dos cloroplastos o que pode resultar em diminuição dos pigmentos fotossintéticos e da fotossíntese (Da Silva et al., 2021). Adicionalmente, a dinâmica dos pigmentos fotossintéticos em função do alagamento também é alterada pela coinoculação, já que possivelmente atue potencializando a remobilização de nitrogênio para as folhas mais novas (Juge et al., 2012; Spagnoletti et al., 2020). Por outro lado, a nutrição com nitrato pode levar a uma menor produção de espécies reativas de oxigênio, processo intermediado pelo óxido nítrico, e também

a um aporte de nitrogênio assimilável nas folhas, garantindo a manutenção do teor de pigmentos fotossintéticos durante o período de estresse (Da Silva et al., 2021).

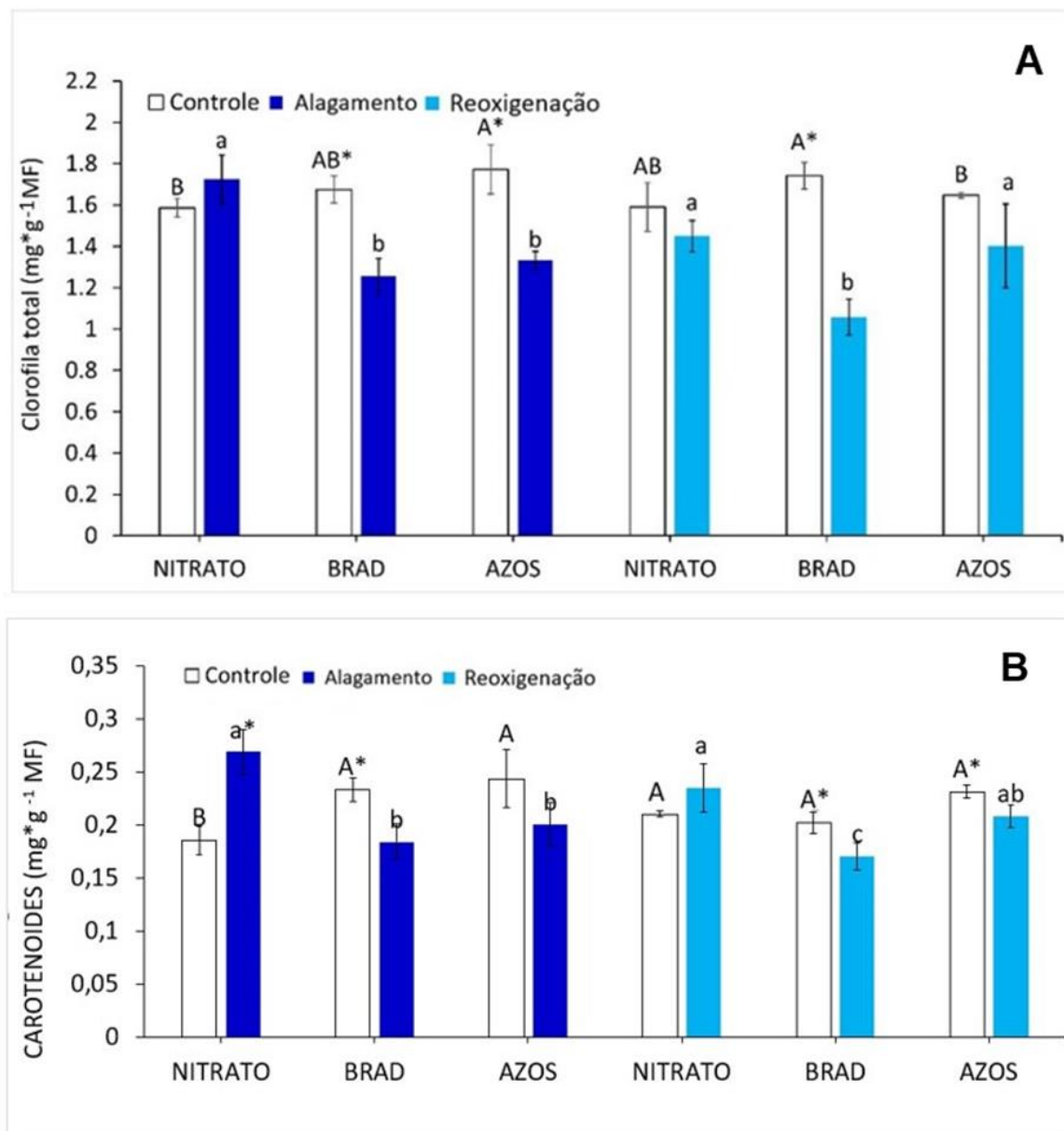


Figura 1: Teores de clorofila total (A) e de carotenoides (B), em plantas de soja cultivadas sob diferentes associações simbióticas e submetidas ao alagamento (8 dias) e posterior drenagem (4 dias). Valores representam a média \pm DP, $n=4$. Asteriscos indicam diferença entre plantas controles ou alagadas/drenadas (teste t; $P < 0,05$), letras maiúsculas indicam diferença entre os tratamentos em condições de controle, letras minúsculas indicam diferença entre os tratamentos para a condição de alagamento/drenagem (Tukey, $P < 0,05$). NITRATO: Inoculação *Bradyrhizobium* + Nitrato 2,5 mM; BRAD: Inoculação *Bradyrhizobium*; AZOS: coinoculação *Bradyrhizobium* + *Azospirillum brasilense*.

4. CONCLUSÕES

A coinoculação de plantas de soja com *Azospirillum* ou utilização do íon nitrato constituem alternativas que podem ser adotadas para melhorar as respostas das plantas aos danos causados pelo alagamento por meio da diminuição da degradação de clorofila total e carotenoides.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNON, Daniel I. Dennis Robert Hoagland: 1884-1949. **Ciência**, v. 112, n. 2921, pág. 739-742, 1950.

DA-SILVA, Cristiane J.; DO AMARANTE, Luciano. Short-term nitrate supply decreases fermentation and oxidative stress caused by waterlogging in soybean plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 176, p. 104078, 2020.

DA-SILVA, Cristiane J.; DO AMARANTE, Luciano. Time-course biochemical analyses of soybean plants during waterlogging and reoxygenation. **Environmental and Experimental Botany**, v. 180, p. 104242, 2020.

DA-SILVA, Cristiane Jovelina et al. A nutrição com nitrato aumenta os níveis foliares de óxido nítrico e a tolerância ao alagamento na soja. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 43, n. 8, p. 116, 2021.

Juge, C., Prévost, D., Bertrand, A., Bipfubusa, M., & Chalifour, F. P. (2012). Growth and biochemical responses of soybean to double and triple microbial associations with *Bradyrhizobium*, *Azospirillum* and arbuscular mycorrhizae. **Applied Soil Ecology**, 61, 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.05.006>

KONNERUP, Dennis et al. Waterlogging tolerance, tissue nitrogen and oxygen transport in the forage legume *Melilotus siculus*: a comparison of nodulated and nitrate-fed plants. **Annals of Botany**, v. 121, n. 4, p. 699-709, 2018. Disponível em: <https://academic.oup.com/aob/article/121/4/699/4812469?login=true> Acesso em: 04 Jun 2025.

Liu Y, Gao S, Hu Y, Zhang T, Guo J, Shi L, Li M. (2023). Comparative study of leaf nutrient reabsorption by two different ecotypes of wild soybean under low-nitrogen stress. *PeerJ* 11:e15486 <https://doi.org/10.7717/peerj.15486>

Rahmani, F., & Fattahi, M. H. (2024). Investigation of alterations in droughts and floods patterns induced by climate change. **Acta Geophysica**, 72(1), 405-418.

SHIMOIA, Eduardo Pereira et al. Co-Inoculation of Soybean Seeds with *Azospirillum* and/or *Rhizophagus* Mitigates the Deleterious Effects of Waterlogging in Plants under Enhanced CO₂ Concentrations. **Nitrogen**, v. 5, n. 4, p. 941-976, 2024.

SHIMONO, Hiroyuki et al. Interactive effects of elevated atmospheric CO₂ and waterlogging on vegetative growth of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). **Plant Production Science**, v. 15, n. 3, p. 238-245, 2012.

Spagnoletti, F.N., Cornero, M., Chiocchio, V. et al. (2020). Arbuscular mycorrhiza protects soybean plants against *Macrophomina phaseolina* even under nitrogen fertilization. **Eur J Plant Pathol** 156, 839–849. <https://doi.org/10.1007/s10658-020-01934-w>

(USDA). Soybean 2025 World Production. Foreign Agricultural Service. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/2222000>. Acessado em: 22 Mai 2025.

VOESENEK, L. A. C. J. et al. Flooding stress signaling through perturbations in oxygen, ethylene, nitric oxide and light. **New Phytologist Foundation** 2016.

WELLBURN, A. R. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total Carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of diferente resolution. **Journal Plant Physiology**, v. 144, p. 307-313.