RESPOSTA DO SISTEMA ENZIMÁTICO VEGETAL AO ESTRESSE OXIDATIVO INDUZIDO PELO ÓLEO ESSENCIAL DE GOIABEIRA

Carolyn Cristina Vale da Silva, Ana Julia Seixas Cortez, Letícia Lima de Paula, Jaqueline Rodrigues Cindra de Lima Souza, Eliane Valeria de Barros, Tércio da Silva de Souza.

Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) /Campus Vitória, Avenida Vitória, 1729, Jucutuquara - 29040 780 - Vitória-ES, Brasil, crlyncris.2007@gmail.com, anajscortez@gmail.com; leticialima2863@gmail.com, jrsouza@ifes.edu.br, ebarros@ifes.edu.br, tssouza@ifes.edu.br

Resumo

O óleo essencial de goiabeira (*Psidium guajava*) apresenta potencial fitotóxico e pode provocar alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas. Neste presente estudo, o foco foi direcionado à avaliação da resposta do sistema enzimático antioxidante de hortaliças e ervas daninha, sendo-as *Lactuca sativa*, *Allium cepa*, *Bidens pilosa* e *Lollium multiflorum*, que foram submetidas ao estresse induzido pelo óleo essencial de goiabeira (OE-Goi). Foram avaliadas as atividades das enzimas catalase (CAT), peroxidase (POD), ascórbico peroxidase (APX) e polifenol oxidase (PPO), utilizando-se como referência os tratamentos controle e OE-Goi. Os resultados demonstraram que a alface e as ervas daninhas apresentaram uma elevada suscetibilidade ao óleo, em contraste a cebola mostrou maior tolerância. Em conjunto, os resultados indicam que o OE-Goi interfere no equilíbrio antioxidante das plantas, desencadeando diferentes estratégias bioquímicas de resposta ao estresse.
Palavras-chave: Estresse oxidativo. Fitotoxicidade. Enzima antioxidante.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra - Química

Introdução

O controle químico por meio de herbicidas sintéticos consolidou-se como uma das principais estratégias para o manejo de plantas daninhas na agricultura mundial, principalmente em razão de sua elevada eficiência, praticidade e viabilidade operacional (ALCÁNTARA-DE LA CRUZ et al., 2026). Entretanto, a utilização intensiva, contínua e recorrente desses produtos tem provocado impactos agronômicos, ecológicos e ambientais relevantes, contribuindo para alterações nas interações estabelecidas nos agroecossistemas e exercendo forte pressão seletiva sobre as comunidades vegetais.

Nesse cenário, as plantas daninhas constituem um dos principais desafios para a produção agrícola, devido à sua capacidade de competir diretamente com as culturas por recursos essenciais, como água, luz e nutrientes, comprometendo o rendimento das lavouras e a eficiência das operações de colheita. Além disso, a dinâmica populacional e evolutiva dessas comunidades encontra-se estreitamente relacionada à pressão seletiva promovida pelo uso repetitivo de herbicidas que apresentam o mesmo mecanismo de ação, favorecendo a seleção e a disseminação de populações com maior capacidade de sobrevivência aos tratamentos (KUMAR et al., 2023; MARKUS et al., 2021).

Nesse contexto, os bioherbicidas formulados a partir de óleos essenciais (OEs) obtidos de plantas aromáticas apresentam-se como uma alternativa promissora e ambientalmente mais sustentável para o manejo de plantas daninhas (EL KHETABI et al., 2022; LENGAI; MUTHOMI; MBEGA, 2020; LI; QIAO; ZHANG, 2025). Os OEs constituem misturas complexas de metabólitos secundários voláteis, formadas principalmente por monoterpenos, sesquiterpenos e seus derivados oxigenados. Em comparação aos herbicidas sintéticos, esses compostos apresentam ampla diversidade estrutural e podem atuar por diferentes mecanismos, além de serem suscetíveis à degradação ambiental decorrente da exposição à radiação luminosa, ao oxigênio e às variações de temperatura, o que pode contribuir para a redução de sua persistência no ambiente. Entre as espécies vegetais de interesse, destaca-se a *Psidium guajava* L. (Myrtaceae), conhecida popularmente como goiabeira, cujas folhas apresentam significativo potencial biológico. A extração de óleo essencial dessa

espécie tem despertado interesse científico devido à presença de compostos bioativos e terpenoides associados a propriedades antioxidantes, antimicrobianas e inseticidas (BORAH et al., 2019; HUYNH et al., 2025; SALUNKE et al., 2024).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial fitotóxico e os mecanismos bioquímicos de ação do óleo essencial de *Psidium guajava* (OE-Goi), contribuindo para ampliar a compreensão de sua utilização como bioherbicida e para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis e eficientes no manejo de plantas daninhas.

Metodologia

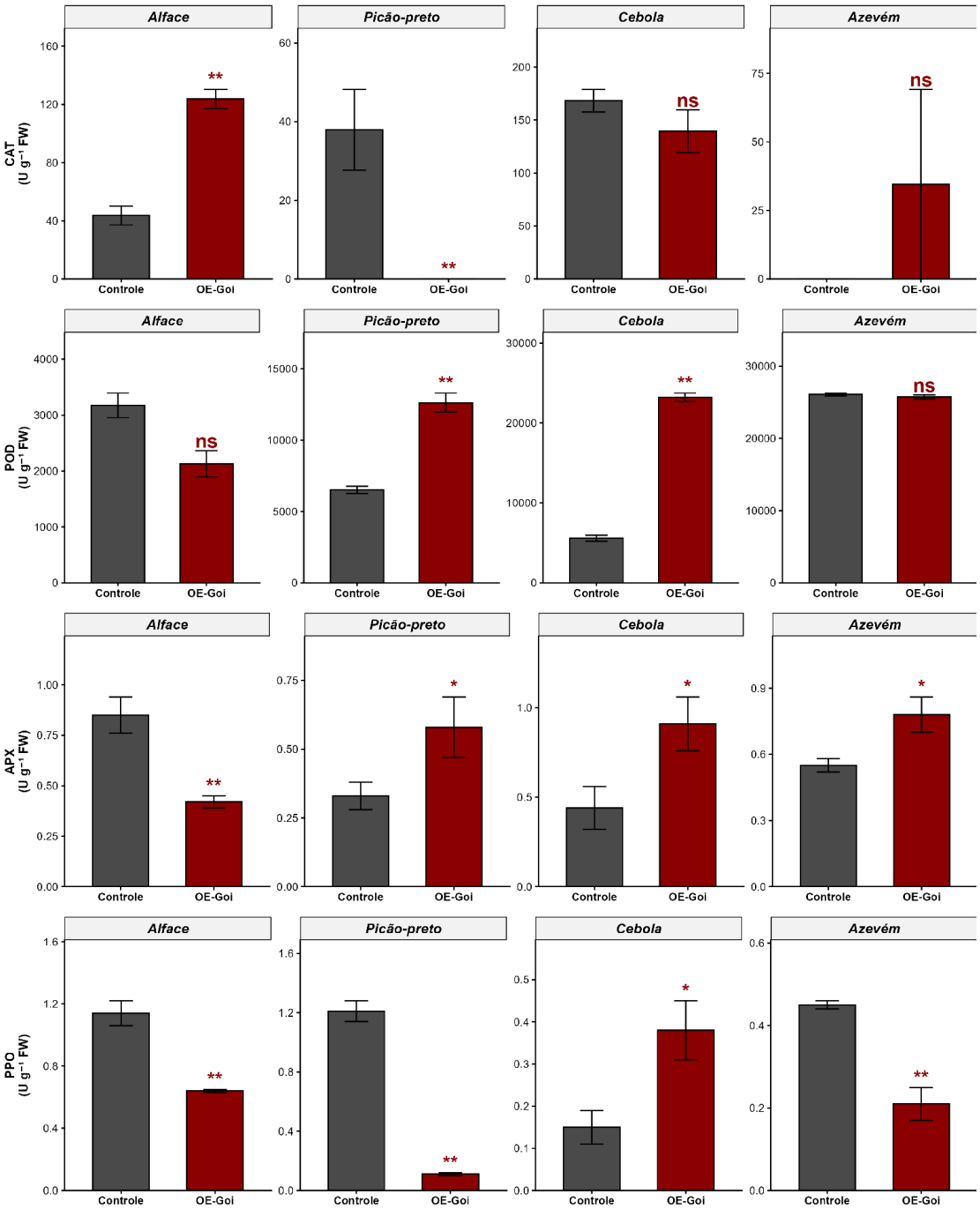
O óleo essencial de goiabeira (OE-Goi) utilizado no projeto foi adquirido da Legee Óleos Essenciais e Compostos. A densidade do OE-Goi foi determinada por meio do método direto de medição proposto por De Jesus e Palma (2008), com as devidas adaptações experimentais, sendo pipetadas 0,100 mL do OE em dez repetições.

Foram utilizadas sementes ou plântulas remanescentes do ensaio de fitotoxicidade, expostas à concentração mais próxima da CI_{50} e ao controle negativo (C−), após 168 h de incubação. Para a obtenção do extrato enzimático, 0,2 g de material vegetal foram macerados em banho de gelo com 2 mL de tampão fosfato de potássio (50 mM; pH 7,0), 100 mg de PVPP e 100 mg de areia de quartzo. O homogenato foi centrifugado a 5.000 rpm por 10 min a 20°C, e o sobrenadante foi utilizado para a determinação das atividades enzimáticas

A atividade das enzimas catalase (CAT), peroxidase (POD), ascorbato peroxidase (APX) e polifenoloxidase (PPO) foram determinadas por métodos espectrofotométricos, conforme Flores et al. (2014), Kong et al. (2021) e Pouresmaeil et al. (2020). As reações foram monitoradas por 2 min, nos comprimentos de onda de 240 nm (CAT), 470 nm (POD), 290 nm (APX) e 420 nm (PPO), respectivamente. Os resultados foram expressos em U/g de massa fresca, conforme as equações específicas para cada enzima.

Resultados

Figura 1 - Painel integrado das respostas enzimáticas antioxidantes sob estresse induzido por OE-Goi.



Legenda: OE-Goi – Óleo essencial de goiabeira (*Psidium guajava*). Concentração de 5000 mg L^{-1}. CAT: catalase; POD: peroxidase; APX: ascorbato peroxidase; PPO: polifenol oxidase. As barras representam a média ± erro padrão (n = 3). Asteriscos (*p < 0,05 e **p < 0,01) indicam diferenças estatisticamente significativas entre as médias do controle (ausência) e do tratamento (presença do OE-Goi) pelo teste t de *Student* para amostras independentes com variâncias heterogêneas.

Discussão

As enzimas antioxidantes catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e peroxidase (POD) atuam de forma integrada na desintoxicação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e na manutenção da homeostase redox celular, desempenhando papel fundamental em processos fisiológicos críticos, como a embebição de sementes e a protrusão da radícula (ANJUM et al., 2016). Adicionalmente, as polifenoloxidases (PPO) catalisam a oxidação de compostos fenólicos em o-quinonas altamente reativas, contribuindo para a formação de barreiras estruturais de defesa, lignificação e reparo tecidual (ZHANG; SUN, 2021).

A exposição das plântulas ao óleo essencial de goiabeira (OE-Goi), promoveu efeitos significativos na atividade enzimática, resultando em alterações e evidenciando estresse oxidativo diversos em cada espécie analisada.

As eudicotiledoneas *Lactuca sativa* (alface) e *Bidens pilosa* (picão-preto), apresentaram diferentes padrões de resposta no sistema antioxidante primário, evidenciados pelas alterações nas atividades das enzimas CAT e APX. Em *L. sativa* a atividade da catase (CAT) aumentou de 43,64 para 123,76 U g^{-1} Fw (+183,6%), indicando forte ativação de mecanismos compensatórios frente ao acúmulo intracelular de H_2O_2. Em contrapartida, houve inibição significativa da ascorbato peroxidase (APX), com redução de 50,6% (de 0,85 para U g^{-1} Fw), sugerindo limitação funcional do ciclo ascorbato–glutationa (MITTLER, 2002; BAKKALI et al., 2008), a POD apresentou redução não significativa (de 3175,03 para 2129,21 U g^{-1} Fw), enquanto a PPO foi significativamente inibida em 43,9% (de 1,14 para 0,64 U g^{-1} Fw). Em *B. pilosa* a atividade da CAT, detectável no controle (37,94 U g^{-1} Fw), foi completamente suprimida após o tratamento, enquanto a APX apresentou incremento significativo de 75,8% (de 0,33 para 0,58 U g^{-1} Fw). Esse padrão indica ativação compensatória da APX na detoxificação de H_2O_2 frente à inativação da via catalítica primária mediada pela CAT (NOCTOR; FOYER, 1998; VERDEGUER et al., 2020), exibiu forte indução da POD (+93,8%; de 6516,36 para 12625,70 U g^{-1} Fw), concomitante a uma redução acentuada da PPO (−90,9%; de 1,21 para 0,11 U g^{-1} Fw), indicando desregulação severa da via fenólica (FERNANDES et al., 2013).

Entre as monocotiledôneas, *Lolium multiflorum* (azevém) manteve estabilidade no sistema antioxidante primário, com atividade de CAT indetectável em ambos os grupos e ausência de variação significativa na POD (de 26063,27 para 25720,73 U U g^{-1} Fw). No entanto, houve indução significativa da APX (+41,8%; de 0,55 para 0,78 U g^{-1} Fw), acompanhada de redução da PPO (−53,3%; de 0,45 para 0,21 U g^{-1} Fw), sugerindo ajuste metabólico pontual. Em contraste, *Allium cepa* (cebola) apresentou resposta intensamente desregulada no sistema peroxidativo. A CAT manteve-se estável (ns), enquanto a POD foi fortemente induzida (+315,7%; de 5579,39 para 23195,15 U g^{-1} Fw). Adicionalmente, observou-se aumento coordenado da APX (+106,8%; de 0,44 para 0,91 U g^{-1} Fw) e da PPO (+153,3%; de 0,15 para 0,38 U g^{-1} Fw), evidenciando ativação robusta de mecanismos antioxidantes e de defesa secundária (ARIAS; FEIJOO; MOREIRA, 2022; ZHANG; SUN, 2021).

Conclusão

Os resultados obtidos demonstram que o óleo essencial de *Psidium guajava* (OE-Goi) apresenta potencial fitotóxico associado à modulação do sistema antioxidante das espécies avaliadas. *Lolium multiflorum* e *Bidens pilosa* apresentaram maior suscetibilidade à exposição ao OE-Goi, enquanto *Allium cepa* demonstrou maior tolerância relativa. Essa diferença de sensibilidade foi acompanhada por respostas enzimáticas distintas, evidenciando diferentes estratégias de defesa frente ao estresse provocado pelo óleo.

Nas espécies mais suscetíveis, observaram-se alterações importantes no sistema antioxidante, como a supressão da CAT em *B. pilosa* e o aumento da APX em *L. multiflorum*. Em contraste, A. cepa apresentou uma resposta antioxidante mais intensa, caracterizada pelo aumento de POD, APX e PPO, sugerindo maior capacidade de ativação de mecanismos de defesa diante da exposição ao OE-Goi. *Lactuca sativa* apresentou comportamento intermediário, com forte aumento da CAT acompanhado pela redução da APX e PPO.

Em conjunto, os resultados sugerem que os compostos presentes no OE-Goi podem interferir no equilíbrio oxidativo das plantas, promovendo diferentes níveis de estresse e respostas antioxidantes entre as espécies. A maior suscetibilidade observada em *L. multiflorum* e *B. pilosa*, associada à maior tolerância relativa de A. cepa, sugere a existência de uma possível faixa de seletividade do OE-Goi.

Dessa forma, o óleo essencial apresenta potencial como bioherbicida de origem natural, especialmente para o manejo de plantas daninhas, embora sejam necessários estudos adicionais para confirmar sua seletividade, eficácia e segurança em condições de aplicação.

Referências

ALCÁNTARA-DE LA CRUZ, Ricardo et al. Thirty years of glyphosate-resistant crops and weeds: Current situation and future prospects. **Pest Management Science**, 2026. Disponivel em: https://doi.org/10.1002/ps.70742. Acesso em: 21 ago. 2026.

ANJUM, N.A. et al. Biophysical and biochemical markers of metal/metalloid-impacts in salt marsh halophytes and their implications. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, p. 24, 2016. Disponivel em: https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00024. Acesso em: 21 ago. 2026.

ARIAS, Ana; FEIJOO, Gumersindo; MOREIRA, Maria Teresa. Exploring the potential of antioxidants from fruits and vegetables and strategies for their recovery. **Innovative food science & emerging technologies**, v. 77, p. 102974, 2022. Disponivel em: https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102974. Acesso em: 20 jul. 2026.

BAKKALI, F., AVERBECK, S., AVERBECK, D., IDAOMAR, M. Biological effects of essential oils - A review. **Food and Chemical Toxicology**, v. 46, n. 2, p.446-475. 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/10.1016/j.fct.2007.09.106. Acesso em: 22 ago. 2026.

BORAH, Angana et al. Chemical composition of leaf essential oil of *Psidium guajava* L. from North East India. **Journal of Essential Oil Bearing Plants**, v. 22, n. 1, p. 248-253, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1574213. Aceso em: 22 ago. 2026

DE JESUS, V. L. B.; PALMA, D. A. Medição da densidade do óleo: uma discussão sobre sua otimização e diminuição dos custos via incerteza relativa da medição. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 3, p. 3302.1–3302.6, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1806-11172008005000002. Acesso em: 20 ago 2026.

DE SOUZA, Tercio.Silva. et al. Chemotype diversity of Psidium guajava L. Phytochemistry, v. 153, p. 129-137, 2018. Disponivel em: https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2018.06.006. Acesso em: 23 ago. 2026.

EL KHETABI, Assia et al. Role of plant extracts and essential oils in fighting against postharvest fruit pathogens and extending fruit shelf life: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 120, p. 402-417, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.009. Acesso em: 21 ago. 2026

FERNANDES, C. F. et al. Estresse oxidativo e o mecanismo de defesa de plantas contra patógenos. Porto Velho, RO: Embrapa Rondônia, 2013. 11 p. (Documentos / Embrapa Rondônia, ISSN 0103-9865; 157). Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1012278. Acesso em: 22 ago. 2026.

FLORES, A. V.; BORGES, E. E. D. L.; GUIMARÃES, V. M.; GONÇALVES, J. F. D. C.; ATAÍDE, G. D. M.; BARROS, D. D. P. Atividade enzimática durante a germinação de sementes de Melanoxylon brauna Schott sob diferentes temperaturas. Cerne, v. 20, p. 401-408, 2014. Disponivel em: https://doi.org/10.1590/01047760201420031399. Acesso em: 23 ago. 2026

HUYNH, Hoang Duy et al. Bioactive Compounds from Guava Leaves (*Psidium guajava* L.): Characterization, Biological Activity, Synergistic Effects, and Technological Applications. **Molecules**, v. 30, n. 6, p. 1278, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/molecules30061278. Aceso em: 23 ago. 2026.

KONG, Qingbo et al. Chemical composition and allelopathic effect of essential oil of *Litsea pungens*. **Agronomy**, v. 11, n. 6, p. 1115, 2021. Disponivel em: https://doi.org/10.3390/agronomy11061115. Acesso em: 22 ago. 2026.

KUMAR, Vipin et al. The scenario of herbicide-resistant weeds: management challenges and perspectives. **Indian Journal of Weed Science**, v. 55, n. 2, p. 123-132, 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.5958/0974-8164.2023.00023.0. Acesso em: 23 ago. 2026.

LENGAI, Geraldin MW; MUTHOMI, James W.; MBEGA, Ernest R. Phytochemical activity and role of botanical pesticides in pest management for sustainable agricultural crop production. **Scientific African**, v. 7, p. e00239, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00239. Acesso em: 21 ago. 2026.

LI, Hui; QIAO, Sheng; ZHANG, Shuaibing. Essential oils in grain storage: A comprehensive review of insecticidal and antimicrobial constituents, mechanisms, and applications for grain security. **Journal of Stored Products Research**, v. 111, p. 102537, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102537. Acesso em: 26 jun. 2026.

MARKUS, C. et al. **Resistência de plantas daninhas aos herbicidas**. In: Resistência de Plantas Daninhas aos Herbicidas. Jaboticabal: Fábrica da Palavra, 2021. p. 324-364. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Giliardi-Dalazen/publication/349506197_RESISTENCIA_DE_PLANTAS_DANINHAS_AOS_HERBICIDAS/links/60341b59a6fdcc37a8462b2e/RESISTENCIA-DE-PLANTAS-DANINHAS-AOS-HERBICIDAS.pdf. Acesso em: 22 ago. 2026.

MITTLER, Ron. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in plant science**, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002. Disponivem em: https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9. Acesso em: 23 ago. 2026.

NOCTOR, Graham; FOYER, Christine H. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. **Annual review of plant biology**, v. 49, n. 1, p. 249-279, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.249. Acesso em: 22 ago. 2026.

POURESMAEIL, M.; NOJADEH, M. S.; MOVAFEGHI, A.; MAGGI, F. Exploring the bio-control efficacy of *Artemisia fragrans* essential oil on the perennial weed *Convolvulus arvensis*: Inhibitory effects on the photosynthetic machinery and induction of oxidative stress. **Industrial Crops and Products**, v. 155, p. 112785, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112785. Acesso em: 22 ago. 2026.

SALUNKE, Malati R. et al. Guava Oil: A Detailed Review on Pharmacognosy, Phytochemistry and Medicinal Properties. **Pharmacognosy Reviews**, v. 18, n. 35, 2024. Disponuvel em: https://doi.org/10.5530/phrev.2024.18.3. Acesso em: 21 ago. 2026.

VERDEGUER, M.; SÁNCHEZ-MOREIRAS, A. M.; ARANITI, F. Phytotoxic effects and mechanism of action of essential oils and terpenoids. **Plants**, v. 9, n. 11, p.1571. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/plants9111571. Acesso em: 23 ago. 2026.

ZHANG, J. SUN, X. Recent advances in polyphenol oxidase-mediated plant stress responses. **Phytochemistry**, v. 181, p. 112588, 2021. Disponivel em: https://doi.org/10.3389/10.1016/j.phytochem.2020.112588. Aceso em: 23 ago. 2026.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Vitória, pela infraestrutura e disponibilização de equipamentos. E ao Laboratório de Química Aplicada – Ifes/Alegre.