

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ALTAMIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E CONSERVAÇÃO

**MARIA DANYELLE VIEIRA LEAL**

**PLANTAS ACUMULADORAS DE ALUMÍNIO: PANORAMA GLOBAL E ESTUDO  
ECOFISIOLÓGICO EM QUATRO ESPÉCIES DE MELASTOMATACEAE  
NATIVAS DA AMAZÔNIA**

ALTAMIRA-PA  
2025

**MARIA DANYELLE VIEIRA LEAL**

**PLANTAS ACUMULADORAS DE ALUMÍNIO: PANORAMA GLOBAL E ESTUDO  
ECOFISIOLÓGICO EM QUATRO ESPÉCIES DE MELASTOMATACEAE  
NATIVAS DA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Pará, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação para obtenção do título de mestre.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Raírys Cravo Herrera

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Laísa Maria de Resende Castro

ALTAMIRA-PA  
2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

L433p Leal, Maria Danyelle Vieira.  
PLANTAS ACUMULADORAS DE ALUMÍNIO :  
PANORAMA GLOBAL E ESTUDO ECOFISIOLÓGICO EM  
QUATRO ESPÉCIES DE MELASTOMATACEAE NATIVAS  
DA AMAZÔNIA / Maria Danyelle Vieira Leal. — 2025.  
125 f. : il. color.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dra. Raírys Cravo Herrera  
Coorientação: Prof<sup>a</sup>. Dra. Laísa Maria de Resende Castro  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Campus Universitário de Altamira, Programa de Pós-Graduação  
em Biodiversidade e Conservação, Altamira, 2025.

1. Alumínio. 2. Cienciometria. 3. ESEC Terra do Meio. 4.  
Anatomia. 5. Melastomataceae. I. Título.

CDD 571.3

---

**MARIA DANYELLE VIEIRA LEAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Pará, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação para obtenção do título de mestre.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Raírys Cravo Herrera

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Laísa Maria de Resende Castro

**Aprovada em:** 26 de fevereiro de 2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Alisson Rodrigo Souza Reis – Universidade Federal do Pará – UFPA/Altamira

---

Christina Cleo Vinson Williams – Universidade Federal do Pará – UFPA/Belém

---

Ivan Becari Viana - Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG/Carangola

À minha família, pelo incentivo incondicional,  
e a todos que contribuíram para a realização do  
trabalho.

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela dádiva de viver e estar em pleno gozo de saúde para conquistar meus objetivos.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), através do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação (PPGBC), por proporcionar minha qualificação profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA), pelo financiamento da bolsa de mestrado concedida.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Raírys Herrera, pela orientação, por abrir as portas de seu laboratório e grupo de pesquisa, acolhendo-me e contribuindo para minha formação durante o mestrado.

À “flor de cacto”, Prof.<sup>a</sup> Dra. Laísa Castro, pessoa por quem nutro grande apreço e admiração, pela coorientação, amizade e ensinamentos.

À equipe do Projeto “Existem plantas acumuladoras de alumínio na Amazônia?” por toda a ajuda fornecida até a conclusão deste trabalho, especialmente em nome de Hanryelle Gonçalves, amiga e estudante de iniciação científica do ensino médio, que me acompanhou constantemente nas atividades laboratoriais deste trabalho.

Ao laboratório de Química da Biomassa e Tecnologia da Madeira da Faculdade de Engenharia Florestal da UFPA, *campus* Altamira, na pessoa do Prof. Dr. Alisson Reis, pelos subsídios de recursos laboratoriais.

Ao grupo de pesquisa Amazon Research Team da University of Turku, Finlândia, que nos cedeu dados de solo e forneceu subsídios para a realização da etapa de campo deste estudo.

Ao Prof. Dr. Alex Lima, meu conterrâneo, pela parceria, paciência e disponibilidade para ajudar na elaboração dos recursos visuais cartográficos.

Ao Laboratório de Botânica e Inovação Tecnologia (Labotec) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) *campus* Altamira e Laboratório de Biotecnologia da UFPA-Altamira (Biotec) pelo apoio tecno-científico prestado, úteis para minha formação pessoal e profissional.

À minha família nortista, constituída pelos amigos que fiz durante minha estadia de quase dois anos em Altamira-PA, pelo apoio emocional. Especialmente às integrantes do grupo “meninas do PPGBC”, com quem compartilhei momentos inesquecíveis.

A Louise Cristine Piedade, minha irmã científica, pela amizade, apoio emocional e profissional, que, mesmo de longe, não mediu esforços para me ajudar em todos os momentos que precisei.

À minha família, pelo apoio incondicional durante o mestrado e por serem meu ponto de motivação diária.

E por fim, mas não menos importante, agradeço a mim mesma, por nunca ter descreditado na minha competência e potencial enquanto pesquisadora. Obrigada a todos!

“O ato de fazer um pouco todos os dias de coração,  
alma leve, e no seu ritmo te levará às mais incríveis  
conquistas”

Van Brandoon

## RESUMO GERAL

Plantas acumuladoras de alumínio (Al) possuem a capacidade de se desenvolver em solos com altos níveis desse elemento na forma ionizada, uma condição que geralmente é tóxica para a maioria das plantas em ambientes ácidos. Essas espécies têm despertado interesse por sua relevância nos processos ecofisiológicos e pelo potencial para inovações biotecnológicas no manejo de solos ácidos, especialmente em regiões onde a acidez do solo é um fator limitante para a agricultura. No Brasil, estudos sobre essas plantas têm se concentrado na savana brasileira, deixando lacunas significativas em outros biomas, como a Amazônia. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar o estado da arte global sobre plantas acumuladoras de Al, mapear sua distribuição geográfica em nível internacional e nacional e analisar o acúmulo do metal em quatro espécies da família Melastomataceae nativas da Amazônia brasileira. A dissertação foi estruturada em dois capítulos. O primeiro utilizou abordagens cienciométricas e de revisão sistemática com dados coletados nas bases *Web of Science* e *Scopus*, empregando termos de busca como “plants”, “hyperaccumulat\*”, “Al accumulat\*” e “tolerant plants”. Foram identificados 862 documentos, dos quais 129 atendiam aos critérios de elegibilidade. Os resultados evidenciaram que a produção científica está concentrada na China (31,49%), Japão (24,40%) e Brasil (20,47%), com ênfase na fisiologia (67,71% das publicações). As plantas acumuladoras de Al pertencem a 68 famílias botânicas, sendo 94,14% Angiospermas, predominando em regiões tropicais da Ásia e América. O segundo capítulo envolveu expedições científicas à Boca do Iriri e à Estação Ecológica Terra do Meio, no município de Altamira-PA, para identificar espécies acumuladoras de Al entre indivíduos de Melastomataceae. Em seis transectos de 500 x 5 m em floresta não inundável, foram coletadas amostras foliares e de solo. As análises anatômicas, histoquímicas e químicas revelaram que as quatro espécies estudadas apresentam hiperacumulação de Al, com teores médios variando entre 17.256,63 mg/kg e 30.660,93 mg/kg de Al na matéria seca, sendo o maior valor registrado em *Miconia affinis* DC. O registro de acumulação de Al em *M. affinis* e *Miconia chrysophylla*-(Rich) Urb. são feitos pela primeira vez neste estudo. O alumínio foi encontrado armazenado na parede celular da epiderme, do colênquima e no parênquima paliçádico das quatro espécies analisadas. Embora, apenas um dos testes histoquímicos tenha sido capaz de detectar a presença de Al nos tecidos de *Bellucia grossularioides* (L.) Triana. Assim, este estudo amplia o conhecimento sobre as plantas acumuladoras de Al e aponta para a importância de expandir pesquisas na Amazônia, contribuindo para o manejo sustentável de solos ácidos e a conservação da maior floresta tropical úmida do mundo.

**Palavras-chave:** Alumínio; Cienciométrica; ESEC Terra do Meio; Anatomia; Melastomataceae; Solos Amazônicos.

## GENERAL ABSTRACT

Plants that accumulate aluminium (Al) have the ability to grow in soils with high levels of this element in ionized form, a condition that is generally toxic to most plants in acidic environments. These species have aroused interest due to their relevance to ecophysiological processes and their potential for biotechnological innovations in the management of acidic soils, especially in regions where soil acidity is a limiting factor for agriculture. In Brazil, studies on these plants have focused on the Brazilian savannah, leaving significant gaps in other biomes, such as the Amazon. Thus, this work aims to investigate the global state of the art on Al-accumulating plants, map their geographical distribution at an international and national level and analyze the accumulation of the metal in four species of the Melastomataceae family native to the Brazilian Amazon. The dissertation was structured in two chapters. The first used scientometric and systematic review approaches with data collected from the Web of Science and Scopus databases, using search terms such as “plants”, “hyperaccumulat\*”, “Al accumulat\*” and “tolerant plants”. A total of 862 documents were identified, of which 129 met the eligibility criteria. The results show that scientific production is concentrated in China (31.49%), Japan (24.40%) and Brazil (20.47%), with an emphasis on physiology (67.71% of publications). Al-accumulating plants belong to 68 botanical families, 94.14% of which are Angiosperms, predominantly in tropical regions of Asia and America. The second chapter involved scientific expeditions to Boca do Iri and Terra do Meio Ecological Station, in the municipality of Altamira-PA, to identify Al-accumulating species among individuals of Melastomataceae. Leaf and soil samples were collected from six 500 x 5 m transects in non-flooded forest. The anatomical, histochemical and chemical analyses revealed that the four species studied show hyperaccumulation of Al, with average levels varying between 17,256.63 mg/kg and 30,660.93 mg/kg of Al in the dry matter, with the highest value recorded in *Miconia affinis* DC. The record of Al accumulation in *M. affinis* and *Miconia chrysophylla* (Rich) Urb. is the first recorded in this study. Aluminum was found stored in the cell wall of the epidermis, collenchyma and palisade parenchyma of the four species analyzed. However, only one of the histochemical tests was able to detect the presence of Al in the tissues of *Bellucia grossularioides* (L.) Triana. Thus, this study expands knowledge about Al-accumulating plants and points to the importance of expanding research in the Amazon, contributing to the sustainable management of acidic soils and the conservation of the world's largest tropical rainforest.

**Keywords:** Aluminum; Scientometrics; ESEC Terra do Meio; Anatomy; Melastomataceae; Amazonian soils.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	10
REFERÊNCIAS .....	13

### CAPÍTULO I

<b>Plantas Acumuladoras de Alumínio: Distribuição Global, Tendências e Perspectivas Científicas</b> .....	18
Introdução .....	18
Material e Métodos .....	20
Resultados e Discussão .....	23
Conclusão.....	40
Referências.....	41
Material Suplementar.....	47

### CAPÍTULO II

<b>Novos Registros de Melastomataceae Acumuladoras de Alumínio na Amazônia</b> .....	96
Introdução .....	96
Material e métodos.....	98
Resultados .....	103
Discussão .....	112
Referências.....	118
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	125

## INTRODUÇÃO GERAL

O alumínio (Al) é o terceiro elemento químico de maior abundância da crosta terrestre, fazendo parte da composição natural do solo (Rahman; Upadhyaya, 2021). Entretanto, sob condições ácidas, o Al torna-se solúvel, liberando-se na forma de cátion trivalente ( $Al^{3+}$ ), altamente tóxico para diversos organismos, incluindo as plantas (Gautam; Panda; Misra, 2023). Essa forma tóxica do Al é frequentemente encontrada em solos de regiões tropicais e subtropicais do planeta (Kochian *et al.*, 2015), onde processos naturais, como alta precipitação e decomposição da matéria orgânica favorecem a diminuição do pH do solo (Fujii *et al.*, 2011). Além disso, atividades antrópicas, como desmatamento, agricultura intensiva e mineração, intensificam a liberação de  $Al^{3+}$ , aumentando sua disponibilidade no ambiente (Bojórquez-Quintal *et al.*, 2017; Rahman *et al.*, 2018).

Nas plantas, o  $Al^{3+}$  pode causar uma série de alterações morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e moleculares (Castro *et al.*, 2022; Kochian *et al.*, 2015), sendo que os principais sintomas de toxicidade do metal estão relacionados à inibição do crescimento e desenvolvimento radicular desses vegetais (Kochian; Piñeros; Hoekenga, 2005). Entretanto, espécies que habitam solos ácidos ao longo de sua evolução desenvolveram mecanismos de resistência e tolerância ao Al (Ma *et al.*, 2023). As plantas resistentes, denominadas excludentes, impedem que o alumínio entre no simplasto, sendo uma estratégia relevante a eliminação do metal pelo sistema radicular (Grevenstuck; Romano, 2013). Por outro lado, as plantas tolerantes, conhecidas como acumuladoras, armazenam o alumínio em seus tecidos (Jansen *et al.*, 2002).

As plantas acumuladoras de Al possuem concentrações foliares de 1.000 mg/kg ou mais de Al na matéria seca foliar (Chenery, 1948) e, geralmente, a principal estratégia para lidar com a toxicidade do Al envolve a inativação do metal, que ocorre por meio de sua complexação com ácidos orgânicos, como citrato, oxalato e malato (Klug; Kirchner; Horst, 2015; Satoh, 2006; Schmitt; Watanabe; Jansen, 2016).

Embora o Al seja considerado fitotóxico para a maioria das plantas, há evidências de que ele pode exercer efeitos benéficos em algumas espécies acumuladoras, como *Camellia sinensis* (L.) Kuntze, *Camellia japônica* L e *Melastoma malabathricum* L. Nessas espécies, a presença do metal pode estar associada ao aumento da taxa fotossintética, maior produção de biomassa e ativação de mecanismos antioxidativos (Watanabe; Jansen; Osaki, 2006; Hajiboland *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2020). O Al pode ainda ser essencial para o desenvolvimento de estruturas fundamentais em determinadas plantas, como observado em

*Camellia sinensis*, na qual a ausência do metal compromete o crescimento do sistema radicular (Sun *et al.*, 2020).

Para além dos aspectos fisiológicos, as plantas acumuladoras de Al também possuem um histórico de usos culturais e vêm ganhando destaque em aplicações tecnológicas. Historicamente, Al-acumuladores despertaram o interesse do homem como mordentes, onde folhas contendo o metal eram usadas no processo de tingimento natural de tecidos (Jansen *et al.*, 2002; Schmitt *et al.*, 2016). Com o avanço da tecnologia e das pesquisas, tais plantas têm sido exploradas para novas aplicações, como a produção de organismos geneticamente modificados visando aumentar o rendimento de culturas em solos ácidos, onde  $Al^{3+}$  é um desafio para a produtividade agrícola (Rahman *et al.*, 2024; Chauhan *et al.*, 2021). Além dos aspectos econômicos, plantas acumuladoras de Al têm sido consideradas agentes promissores na implementação de técnicas de fitoextração, processo no qual elementos potencialmente tóxicos do solo são captados, translocados e acumulados nas partes colhíveis da planta (Pajević *et al.*, 2016).

Essa relevância prática é reforçada por sua ampla distribuição geográfica e taxonômica, visto que Al-acumuladores são encontrados em todo o mundo em cerca de 45 famílias botânicas, que crescem naturalmente em solos ácidos (Jansen *et al.*, 2002; Zaia; Timpone; Habermann, 2022). As famílias Melastomataceae, Rubiaceae, Symplocaceae, Theaceae e Vochysiaceae, por exemplo, têm sido amplamente estudadas devido ao seu perfil Al-acumulador (Bressan; Coan; Habermann, 2016; Zaia; Timpone; Habermann, 2022). No Cerrado, bioma brasileiro com grandes quantidades de solos ácidos, as famílias Rubiaceae, Melastomataceae e Vochysiaceae são destaques na acumulação de Al (Haridasan 1982; Souza *et al.*, 2020; Bressan; Coan; Habermann, 2016).

Além do Cerrado, a Floresta Amazônica também possui solos ácidos, caracterizados por pH baixo e alta concentração de alumínio permutável (Fageria; Stone, 1999). No estado do Pará, uma das unidades federativas do país abrangidas pela Floresta Amazônica, predominam os Latossolos amarelos, que apresentam pH baixo e são ricos em óxidos de alumínio (Sato *et al.*, 2015; Frare *et al.*, 2023). Ademais, desde a década de 60, a Amazônia paraense tem sofrido intensas alterações devido ao uso e ocupação do solo, o que tem contribuído para a degradação ambiental (Santos *et al.*, 2021) e pode favorecer a solubilização de Al. Apesar dessas condições, nenhum estudo científico exploratório foi realizado para verificar espécies acumuladoras neste domínio fitogeográfico.

Dentre as famílias de Al-acumuladores conhecidas, a família Melastomataceae apresenta a segunda maior riqueza de espécies acumuladoras do metal no mundo (Chenery,

1948). Constituída por 177 gêneros e cerca de 5.750 espécies, a família mostra maior diversidade em regiões tropicais do globo (Michelangeli *et al.*, 2020). O grupo é composto principalmente por árvores e arbustos, além de uma menor proporção de lianas, epífitas, ervas anuais e perenes (Renner, 1989). Na Amazônia, a família Melastomataceae é a quarta família dominante e a terceira mais rica em espécies arbóreas (Forzza *et al.*, 2010; Ter Steege *et al.*, 2016). Suas estratégias de vida incluem grande produção de sementes, eficiente dispersão de propágulos, altas taxas de germinação e crescimento rápido, características que contribuem para sua ampla distribuição e adaptabilidade (Albuquerque *et al.*, 2013).

No Brasil, Melastomataceae representa a quinta maior família de angiospermas do país (BFG, 2021) e algumas espécies nativas da família, como *Bellucia dichotoma* Cogn., *Miconia albicans* (Sw.) Steud. e *Bellucia grossularioides* (L.) Triana, têm sido estudadas devido ao seu potencial farmacológico (Martins *et al.*, 2016; Yamaguchi; Mendes, 2020; Lopes *et al.*, 2023). Além disso, como certos gêneros da família são característicos de vegetação secundária, apresentando espécies pioneiras (Baider; Tabarelli; Mantovani, 1999), algumas espécies de *Miconia* e *Tococa* têm sido investigadas quanto ao seu potencial uso na restauração de áreas degradadas, especialmente no Cerrado brasileiro (Albuquerque *et al.*, 2013; Sousa *et al.*, 2015).

Neste sentido, considerando que, nos últimos anos, a Amazônia tem sofrido crescentes intervenções antrópicas, como o desmatamento (Santos *et al.*, 2017; Carmo, W.; Carmo, M., 2019; Copertino *et al.*, 2019), e que essas ações não apenas intensificam a carga de alumínio tóxico no ambiente, mas também ameaçam o equilíbrio ecológico e a biodiversidade da região, considerando ainda a relevância das Melastomataceae entre os Al-acumuladores, a representatividade da família na flora amazônica e seu destaque em processos de restauração de áreas degradadas, este estudo torna-se essencial. Contribuindo, portanto, para ampliar os dados sobre espécies nativas e de suas potenciais aplicações no país e fora dele, assim como apresenta uma alternativa promissora para mitigar os impactos ambientais, especialmente atrelados ao processo de acidificação do solo, a partir de espécies adaptadas às condições edáficas da região.

Logo, utilizando de diferentes abordagens metodológicas, buscamos por meio deste trabalho analisar o estado da arte do conhecimento global sobre plantas acumuladoras de Al, mapeando a distribuição geográfica dessas plantas a nível internacional e nacional, além de analisar a acumulação do metal em quatro indivíduos da família Melastomataceae nativos da Amazônia brasileira.

Para tanto, o estudo está subdividido em dois capítulos. O primeiro capítulo apresenta um panorama geral sobre as tendências científicas no estudo das plantas acumuladoras de alumínio e sua distribuição no mundo, com ênfase no Brasil, visando entender e identificar lacunas de conhecimento nesta área de pesquisa. O segundo capítulo tem como objetivo identificar novos acumuladores de Al em Melastomataceae nativas da Amazônia brasileira, por meio da determinação da concentração e localização dos sítios de acumulação do metal nos tecidos foliares das plantas.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, L. B.; AQUINO, F. G.; COSTA, L. C.; MIRANDA, Z. J. G.; SOUSA, S. R. Espécies de Melastomataceae Juss. com potencial para restauração ecológica de mata ripária no cerrado. **Polibotânica**, n. 35, p. 1-19, 2013.
- BAIDER, C.; TABARELLI, M. E.; MANTOVANI, W. O banco de sementes de um trecho de floresta atlântica montana (São Paulo, Brasil). **Revista Brasileira de Biologia**, v. 59, n. 2, p. 319-328, 1999.
- BFG. Brazilian Flora 2020: Leveraging the power of a collaborative scientific network. **TAXON**, v. 71, p. 178-198, 2021.
- BOJÓRQUEZ-QUINTAL, E. ESCALANTE-MAGAÑA, C.; ECHEVARRÍA-MACHADO, I.; MARTÍNEZ-ESTÉVEZ, M. Aluminum, a Friend or Foe of Higher Plants in Acid Soils. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017.
- BRESSAN, A.; COAN, A.; HABERMANN, G. X-ray spectra in SEM and staining with chrome azurol S show Al deposits in leaf tissues of Al-accumulating and non-accumulating plants from the cerrado. **Plant and Soil**, v. 404, n. 1–2, p. 293–306, 2016.
- CARMO, W.; CARMO, M. Desmatamento, queimadas e ameaça de extinção da flora e fauna na Amazônia brasileira. **Revista Científica do Instituto Ideia**, n. 2, ano 8, 2019.
- CASTRO, L.; VINSON, C.; GORDO, S.; WILLIAMS, T.; CURY, N.; SOUZA, M.; PEREIRA, L. Molecular and physiological aspects of plant responses to aluminum: what do we know about Cerrado plants?. **Revista Brasileira de Botânica**. 2022.
- CHAUHAN, D.; YADAV, V.; VACULÍK, M.; GASSMANN, W.; PIKE, S.; ARIF, N.; SINGH, V.; DESHMUKH, R.; SAHI, S.; TRIPATHI, D. Aluminum toxicity and aluminum stress-induced physiological tolerance responses in higher plants. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 41, n. 5, p. 715–730, 2021.
- CHENERY, E. Aluminium in Plants and its Relation to Plant Pigments. **Annals of Botany**, v. 12, n. 2, p. 121–136, 1948.
- COPERTINO, M.; PIEDADE, M. T. F.; VIEIRA, I. C. G.; BUSTAMANTE, M. Desmatamento, fogo e clima estão intimamente conectados na Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 71, n. 4, 2019.
- FAGERIA, N.; STONE, L. Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999.

- FRARE, J.; MARTINS, G.; FREITAS, L.; OLIVEIRA, I.; RAMOS, S. Bioeconomia na Amazônia: importância da matéria orgânica do solo para a manutenção dos sistemas produtivos. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, e28512240261, 2023.
- FORZZA, R.; BAUMGRATZ, J.; COSTA, A.; HOPKINS, M.; LEITMAN, P.; LOHMANN, L.; MARTINELLI, G.; MORIM, M.; COELHO, M.; PEIXOTO, A.; PIRANI, J.; QUEIROZ, L.; STEHMANN, J.; WALTER, B.; ZAPPI, D. Introdução: as angiospermas do Brasil. Catálogo de plantas e fungos do Brasil [online]. **Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro**, Rio de Janeiro, 2010.
- FUJII, K.; HARTONO, A.; FUNAKAWA, S.; UEMURA, M.; SUKARTININGSIH; KOSAKI, T. Acidification of tropical forest soils derived from serpentine and sedimentary rocks in East Kalimantan, Indonesia. **Geoderma**, v. 160, n. 3–4, p. 311–323, 2011.
- GAUTAM, A.; PANDA, A.; MISRA, A. Evaluation of Screening Method for Aluminum-Sensitivity Effects on Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) Varieties Grown in Acid/Neutral Soils. **Letters in Applied NanoBioScience**, v. 12, n. 4, 2023.
- GREVENSTUK, T.; ROMANO A. Aluminium speciation and internal detoxification mechanisms in plants: where do we stand? **Metalomics**. V. 5, n. 12, 2013.
- HAJIBOLAND, R.; RAD, S.; BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Mechanisms of aluminum-induced growth stimulation in tea (*Camellia sinensis*). **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, v. 176, 2013.
- HARIDASAN, M. Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. **Plant Soil**, v. 65, p. 265-273, 1982.
- JANSEN, S.; BROADLEY, M.; ROBBRECHT, E.; SMETS, E. Aluminum Hyperaccumulation in Angiosperms: A Review of Its Phylogenetic Significance. **The Botanical Review**, v. 68, n. 2, p. 235-269, 2002.
- KLUG, B., KIRCHNER, T.; HORST, W. Differences in aluminium accumulation and resistance between genotypes of the genus *Fagopyrum*. **Agronomy**, v. 5, p. 418–434, 2015.
- KOCHIAN, L.; PIÑEROS, M.; HOEKENGA, O. The Physiology, Genetics and Molecular Biology of Plant Aluminum Resistance and Toxicity. **Plant and Soil**, v. 274, n. 1–2, p. 175–195, 2005.
- KOCHIAN, L.; PIÑEROS, M.; LIU, J.; MAGALHAES, J. Plant adaptation to acid soils: The molecular basis for crop aluminum resistance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 66, p. 571–598, 2015.
- LIU, Y.; TAO, J.; CAO, J. ZENG, Y.; LI, X.; MA, J.; HUANG, Z.; JIANG, M.; SUN, L. The Beneficial Effects of Aluminum on the Plant Growth in *Camellia japonica*. **J Soil Sci Plant Nutr**, v. 20, 2020.
- LOPES, T. M.; MORAES, G. F.; SOBREIRA, A. L.; SOUZA, J. B. Potencial farmacológico da canela-de-velho (*Miconia albicans*): uma revisão integrativa. **Revista Colombiana de Ciencias Químico Farmacéuticas**, v. 52, n. 1, p. 435-470, 2023.
- MA, X.; CHENG, L.; PENG, W.; XIE, G.; LIU, Z.; YANG, Z.; WANG, Y.; AN, F. Comparative Transcriptome and Metabolome Analysis of Rubber Trees (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) Response to Aluminum Stress. **Forests**, v. 14, n. 3, p. 568, 13 mar. 2023.

- MARTINS, R. T. D. M. C.; BORGES, A. K. P.; ARMIATO, A. M.; PIMENTA, R. S. Antimicrobial and phytotoxicity activities of aqueous crude extract from the Amazonian ethnomedicinal plant *Bellucia grossularioides* (L.) Triana. **Journal of Medicinal Plants Research**, v. 10, n. 10, p. 130-138, 2016.
- MICHELANGELI, F.; ALMEDA, F.; PENNEYS, D.; GOLDENBERG, R. A Guide to Curating New World Melastomataceae Collections with a Linear Generic Sequence to World-Wide Melastomataceae. **Preprints**, 2020.
- PAJEVIĆ, S.; BORIŠEV, M.; NIKOLIĆ, N.; ARSENOV, D.; ORLOVIĆ, S.; ŽUPUNSKI, M. Phytoextraction of Heavy Metals by Fast-Growing Trees: A Review. *In*: ANSARI, A.; GILL, S.; GILL, R.; LANZA, G.; NEWMAN, L. **Phytoremediation**. London: Springer, p 29–64, 2016.
- RAHMAN, S.; HAN, J.; AHMAD, M.; ASHRAF, M.; KHALIQ, M.; YOUSAF, M.; WANG, Y.; YASIN, G.; NAWAZ, M.; KHAN, K.; DU, Z. Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 269, p. 1-15, 2024.
- RAHMAN, R.; UPADHYAYA, H. Aluminium Toxicity and Its Tolerance in Plant: A Review. **Journal of Plant Biology**, v. 64, n. 2, p. 101–121, 2021.
- RAHMAN, M.; LEE, SH.; JI, HC.; KABIR, AH.; JONES, CS.; LEE, KW. Importance of Mineral Nutrition for Mitigating Aluminum Toxicity in Plants on Acidic Soils: Current Status and Opportunities. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 10, p. 3073, 2018.
- RENNER, S. S. A survey of reproductive biology in Neotropical Melastomataceae and Memecylaceae. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 76, p. 496-518, 1989.
- SANTOS, G.; NARUSAWA, I.; NERIS, J.; NAKAKOJI, N.; LIRA, G.; SANTOS, M.; FREITAS, T. Mapeamento de uso e cobertura da terra no município de Rondon do Pará, nos anos de 1986 e 2019. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.4, n.2, p.1721-1738, 2021.
- SANTOS, T. O.; ANDRADE FILHO, V. S.; ROCHA, V. M.; MENEZES, J. S. Os impactos do desmatamento e queimadas de origem antrópica sobre o clima da Amazônia brasileira: um estudo de revisão. **Revista Geografia Acadêmica**, v. 11, n. 2, 2017.
- SATO, M.; GUEDES, R.; LIMA, H.; FERNANDES, A.; BRAZ, A. Métodos de análise textural para solos do Estado do Pará. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 58, n. 1, p. 90-95, 2015.
- SATOH, S. Organic substances in xylem sap delivered to above-ground organs by the roots. **J. Plant Re.**, v. 119, p. 179–187, 2006.
- SCHMITT, M.; BORAS, S.; TJOA, A.; WATANABE, T.; JANSEN, S. Aluminium Accumulation and Intra-Tree Distribution Patterns in Three Arbor aluminosa (*Symplocos*) Species from Central Sulawesi. **PLoS ONE**, v. 11, n. 2, 2016.
- SCHMITT, M.; WATANABE, T.; JANSEN, S. The effects of aluminium on plant growth in a temperate and deciduous aluminium accumulating species. **AoB Plants**, v. 8, 2016.
- SOUSA, S. R.; ALBUQUERQUE, L. B.; SOUSA, A. C.; PACHÊCO, B. S.; MALAQUIAS, J.; AQUINO, F. G. Enraizamento de estacas de *Miconia* (Melastomataceae): alternativa para

produção de mudas para a restauração ecológica. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 10, n. 3, p. 152-158, 2015.

SOUZA, M.; WILLIAMS, T.; POSCHENRIEDER, C.; JANSEN, S.; PINHEIRO, M.; SOARES, I.; FRANCO, A. Calcicole behaviour of *Callisthene fasciculata* Mart., an Al-accumulating species from the Brazilian Cerrado. **Plant Biology**, v. 22, n. 1, p. 30–37, 2020.

SUN L., ZHANG M., LIU X., MAO Q., SHI C., KOCHIAN L.; LIAO H. Aluminium is essential for root growth and development of tea plants (*Camellia sinensis*). **Jornal of Integrative Plant Biology**, v 62, 2020.

TER STEEGE, H.; VAESSEN, R.; CÁRDENAS-LÓPEZ, D.; SABATIER, D.; ANTONELLI, A.; OLIVEIRA, S.; PITMAN, N.; JØRGENSEN, P.; SALOMÃO, R. The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. **Scientific Reports**, v. 6:, 2016.

WATANABE, T.; JANSEN, S.; OSAKI, M. Al–Fe interactions and growth enhancement in *Melastoma malabathricum* and *Miscanthus sinensis* dominating acid sulphate soils. **Plant, Cell & Environment**, v. 29, 2006.

YAMAGUCHI, K. K. L.; MENDES, V. C. Caracterização fitoquímica e atividade antioxidante de *Bellucia dichotoma* Cogn. **Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza**, v. 4, e.1517, 2020.

ZAIA, M.; TAMPONE, L. T.; HABERMANN, G. Do aluminum (Al)-accumulating species from the Brazilian savanna accumulate Al in the roots?. **Trees**, v. 36, n. 5, p. 1677–1685, 2022.

Este capítulo está formatado nas normas da revista *The Botanical Review*, disponível em:  
<https://link.springer.com/journal/12229/submission-guidelines?IFA>

**CAPÍTULO I**  
**PLANTAS ACUMULADORAS DE ALUMÍNIO:**  
**DISTRIBUIÇÃO GLOBAL, TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS**  
**CIENTÍFICAS**

## Plantas Acumuladoras de Alumínio: Distribuição Global, Tendências e Perspectivas Científicas

Maria Danyelle Vieira Leal<sup>1,4</sup> . Louise Cristine Alves Piedade<sup>1</sup> . Laísa Maria de Resende Castro<sup>2</sup> . Alex de Sousa Lima<sup>3</sup> . Raírys Cravo Herrera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Pará-UFPA, Altamira, Pará, Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação-PPGBC, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará-IFPA, Altamira, Pará, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal do Maranhão

<sup>4</sup>Autor para correspondência; e-mail: mariadanyelle1573@gmail.com

**Resumo:** O estudo teve como objetivo revelar o estado de arte do conhecimento sobre as plantas acumuladoras de alumínio (Al), através de revisão sistemática e análise bibliométrica. As plantas acumuladoras de Al armazenam 1 g/kg de Al em sua matéria seca sem causar danos. Os dados foram coletados nas bases *Web of Science e Scopus*, com a análise bibliométrica conduzida pelo pacote Bibliometrix no R. O mapeamento das plantas foi realizado a partir de revisão sistemática, incluindo dados sobre localização, espécies e concentrações de Al armazenadas. Foram analisados 862 documentos, dos quais 129 atenderam aos critérios de inclusão. A produção científica concentra-se na China (31,49%), Japão (24,40%) e Brasil (20,47%), enquanto as espécies acumuladoras de Al são predominantemente encontradas em regiões tropicais da Ásia, América, Europa e África. Essas plantas estão distribuídas em 68 famílias botânicas, com 94,14% classificadas como Angiospermas. As famílias Melastomataceae, Theaceae e Rubiaceae destacaram-se por incluir espécies com altos níveis de acumulação, superiores a 10 g/kg de Al. As plantas acumuladoras de Al estão distribuídas principalmente em regiões tropicais. Além disso, os principais campos de estudo abrangem fisiologia (67,71%), bioquímica (14,96%) e anatomia (8,66%) vegetal, demonstrando o interesse em aspectos funcionais e estruturais relacionados à acumulação de Al. Apesar dos avanços, ainda existem lacunas, como a falta de estudos detalhados em plantas do bioma Amazônico, por exemplo. Sugere-se ampliar as pesquisas para identificar novas espécies, aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos de tolerância e explorar potenciais aplicações ecológicas e biotecnológicas.

**Palavras-chave:** Cienciometria . Alumínio . Angiospermas . Melastomataceae . Revisão.

### Introdução

O alumínio (Al) é o terceiro elemento químico de maior abundância no planeta terra, e está presente em todos os biomas terrestres. Apesar de ser tipicamente ausente como nutriente e como oligoelemento nas vias bioquímicas dos seres vivos (Pogue & Lukiw, 2014). O Al é considerado fitotóxico para a maioria das plantas quando solubilizado em ambientes ácidos, sendo o cátion trivalente Al<sup>3+</sup> a sua principal forma tóxica (Gautam et al., 2023).

O  $Al^{3+}$  nas plantas desencadeia alterações morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e moleculares, sendo a inibição do crescimento radicular o sintoma predominante (Kochian et al., 2005; Castro et al., 2022). Entretanto, existem plantas que conseguem se desenvolver em solos com altos teores de Al tóxico, sem sofrer danos em seu organismo. Essas plantas podem ser classificadas como excludentes ou acumuladoras de Al (Jansen et al., 2002a). As espécies Al-excludentes evitam a absorção de Al através da secreção de quelantes, como ácidos orgânicos na rizosfera. Enquanto as espécies Al-acumuladoras formam complexos de Al com ácidos orgânicos em seu interior, inativando-o, além de armazenar no mínimo 1 g/kg de Al em sua matéria seca (Chenery, 1948; Jansen et al., 2002a).

Neste sentido, a presença de  $Al^{3+}$  no solo, especialmente em baixas concentrações, não prejudica a biodiversidade nem a produção de biomassa em espécies nativas, ao contrário, pode até estimular o crescimento de algumas delas (Haridasan, & Araújo, 1988; Haridasan, 2008; Kochian et al., 2015; Bojórquez-Quintal et al., 2017; Sun et al., 2020). No Cerrado, por exemplo, diversas espécies conseguem lidar com o Al sem sofrer efeitos nocivos em seu metabolismo, o que permite seu crescimento e desenvolvimento normais (Haridasan, 2008; Castro et al., 2022).

O teor de Al acumulado varia entre as famílias e as espécies, por exemplo, *Miconia albicans* (Sw.) Steud., pertencente à família Melastomataceae, pode acumular de 5,048 g/kg a 7,628 mg/kg em suas folhas, *Camellia oleifera* C. Abel, da família Theaceae, pode acumular até 13,5 g/kg de Al, enquanto *Saprosma arboreum* Blume, da família Rubiaceae, pode acumular 9,854 g/kg na matéria seca vegetal (Jansen et al., 2003; Chen et al., 2008; Timpone & Habermann, 2022). Outros acumuladores, como *Miconia acinodendron* (L.) Tr. (Melastomataceae) e *Symplocos spicata* Roxb. (Symplocaceae) conseguem exceder significativamente o valor de Al estabelecido para a classificação de acumuladores de Al, com acúmulo de 66,1 g/kg e 72,24 g/kg, respectivamente (Chenery, 1948). Espécies com essa capacidade são denominadas hiperacumuladoras de Al, pois acumulam mais de 10 g/kg de Al na matéria seca (Jansen et al., 2002a; Olivares et al., 2010).

Assim, as adaptações das plantas acumuladoras de Al ressaltam sua importância ecológica, como também seu potencial econômico, abrangendo aplicações que vão do manejo de solos ácidos a inovações biotecnológicas (Rahman et al., 2024; Chauhan et al., 2021). A capacidade dessas plantas de acumular grandes quantidades de Al evidencia a complexidade e a diversidade das interações entre as plantas e o ambiente. Considerando a amplitude e o dinamismo das pesquisas sobre a acumulação de Al, torna-se essencial identificar tendências e direcionamentos que orientem os avanços nesse campo.

Nesse contexto, a cienciometria e a revisão sistemática se apresentam como ferramentas indispensáveis para analisar o panorama científico, uma vez que são particularmente úteis para integrar as informações de um conjunto de estudos, além de proporcionarem insights que auxiliam na compreensão do fenômeno e no delineamento de estratégias futuras de pesquisa.

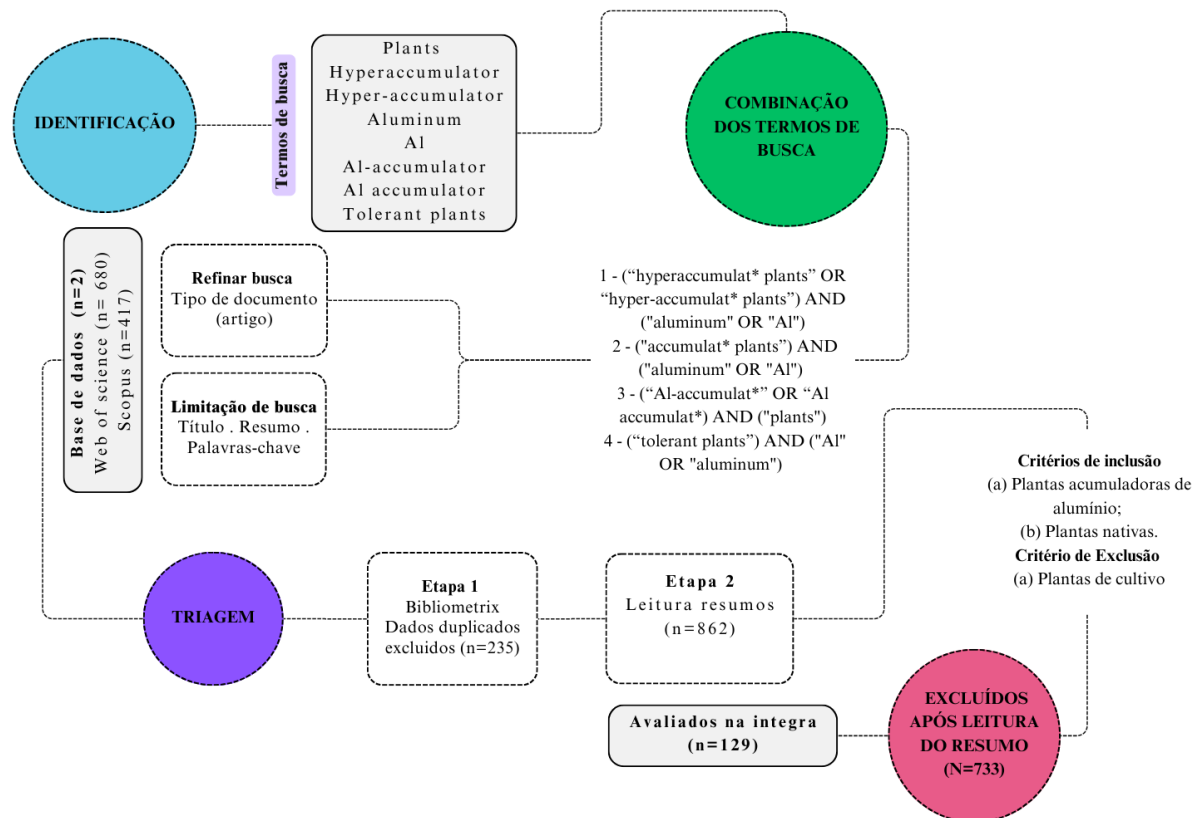
Nesta perspectiva, este estudo teve como objetivo revelar o estado da arte do conhecimento sobre as plantas acumuladoras de Al, através de revisão sistemática e análise cienciométrica. Além de mapear a distribuição global e nacional dessas plantas, com base na revisão sistemática, destaca-se a relevância do Brasil no estudo, devido à sua rica biodiversidade.

## **Material e Métodos**

### **Coleta e processamento de dados**

O conjunto de dados de referência foram coletados nos bancos de dados *Web of Science* e *Scopus* combinando os termos de busca “*plants*”, “*hyperaccumulator*”, “*hyperaccumulator*”, “*aluminum*”, “*Al*”, “*Al-accumulator*”, “*Al accumulator*” e “*tolerant plants*”. Não foi estabelecido um período inicial para a avaliação temporal do objeto de estudo deste trabalho, com o objetivo de coletar o maior número de informações possíveis. No entanto, o material avaliado está restrito à 14 de março de 2024, quando foi realizada a recuperação dos dados.

Operadores booleanos “AND” e “OR” foram usados para a intercessão e alternância dos diferentes termos empregados. Fez-se o uso de caracteres especiais parênteses e aspas (“”) para agrupar termos dentro de uma expressão, e o asterisco (\*) foi aplicado ao final dos termos para recuperar as variações dos sufixos. Usou-se, ainda, a ferramenta “Refinar busca por tipo de documento: artigo” nas bases de dados para restringir as pesquisas a trabalhos científicos de cunho inéditos. Um resumo das etapas metodológicas descritas é fornecido no fluxograma da Figura 1.



**Figura 1.** Fluxograma dos procedimentos metodológicos da obtenção dos artigos nas bases de dados Web of Science e Scopus

Os dados coletados foram, então, submetidos a uma dupla triagem. Na primeira etapa, usou-se o pacote Bibliometrix do programa estatístico R versão 4.3.0 (R Core Team, 2023) para remover dados duplicados. Na segunda etapa, foram aplicados dois critérios de inclusão e um de exclusão para seleção dos artigos que melhor se enquadraram ao objetivo desta pesquisa, a fim de garantir a precisão das informações a serem analisadas.

Desse modo, como critérios de inclusão foi adotado: (a) seleção de publicações que deixavam clara em seu resumo relação direta com plantas acumuladoras de Al; e (b) envolviam plantas nativas. Como único critério de exclusão optou-se por não incluir em análise plantas de cultivo, especialmente as cultivadas em grande escala, como por exemplo, milho, arroz e soja.

Entretanto, uma exceção foi aberta para artigos contendo dados sobre algumas espécies da família botânica Theaceae, como *Camellia sinensis* (L.) Kuntze, *Camellia drupifera* Lour. e *Camellia oleifera* C.Abel, cujo plantio é realizado em escala comercial. Esta mesma exceção foi usada para artigos contendo, dados do acumulador de Al, *Hydrangea*

*macrophylla* (Thunb.) Ser. (Hydrangeaceae). Essas exceções foram justificadas pelo histórico consolidado de acumulação de Al registrado nas famílias mencionadas e em alguns de seus representantes (Jansen et al., 2002a).

### **Análise cienciométrica**

A análise cienciométrica foi realizada por meio da extensão Biblioshiny (Silva et al., 2022) do pacote Bibliometrix do software R versão 4.3.0 (R Core Team, 2023). Os indicadores cienciométricos abordados foram: (I) quantidade de artigos publicados por ano, (II) instituições mais produtivas, (III) número de citações por artigo, (IV) os periódicos mais citados e Fator de Impacto (FI), (V) Rede de colaboração (VI) autores mais produtivos e relevantes na área e (VII) os temas mais abordados. As representações visuais dos indicadores foram feitas usando software R versão 4.3.0 (R Core Team, 2023) e Microsoft® Excel® 365 MSO (Versão 2411 Build 16.0.18227.20082) 64 bits (Microsoft Corporation, 2024).

### **Mapeamento de plantas Al-acumuladoras**

Para mapear a distribuição das plantas acumuladoras de Al com base na produção científica, foi realizada uma revisão sistemática dos 129 documentos recuperados nas bases de dados. Foram coletadas informações sobre a localização das espécies estudadas nesses artigos e seus respectivos dados de acumulação. Uma atualização taxonômica dos organismos acumuladores de Al foi realizada com base nas informações dos herbários virtuais *SpeciesLink* (<https://specieslink.net/>) e *Royal Botanic Gardens* (<https://powo.science.kew.org/>).

Adicionalmente, foram compilados os registros de ocorrência das famílias de plantas acumuladoras de Al identificadas nos estudos, utilizando os dados disponíveis na plataforma Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (<http://www.gbif.org/>). Essa análise teve como objetivo mapear a distribuição geográfica de cada espécie.

As informações coletadas sobre a distribuição das plantas foram representadas em mapas. As representações foram feitas no nível taxonômico de família. Nesta etapa, foram considerados apenas os trabalhos que apresentavam dados de localização e acúmulo de Al em qualquer órgão, com concentração igual ou superior a 1 g/kg, com ênfase nos dados relacionados à parte aérea da planta. O mapa foi produzido no software livre QGIS versão 3.34.10 (QGIS Development Team, 2024), utilizando-se a base de países disponibilizada pelo site Eurostat (<https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/administrative-units/countries>), edição de 2024. Os dados foram organizados conforme a geolocalização das plantas obtida nos artigos.

### **Análise estatística**

Os dados foram testados quanto ao tipo de distribuição e variância, utilizando os testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. O teste t de Student foi aplicado para comparar a capacidade de acumular Al entre os grupos de criptógamas, enquanto o teste de Kruskal-Wallis foi utilizado com a mesma finalidade para as fanerógamas. O teste *post hoc* de Dunn, com ajuste de Bonferroni, foi empregado para realizar comparações múltiplas entre as fanerógamas. Para reduzir assimetrias e disparidades, os dados foram transformados logaritmicamente.

As análises foram realizadas na linguagem de programação R, versão 4.4.1 (R Core Team, 2023), com um nível de significância de 0,05, e incluíram apenas informações dos grupos com, no mínimo, três amostras.

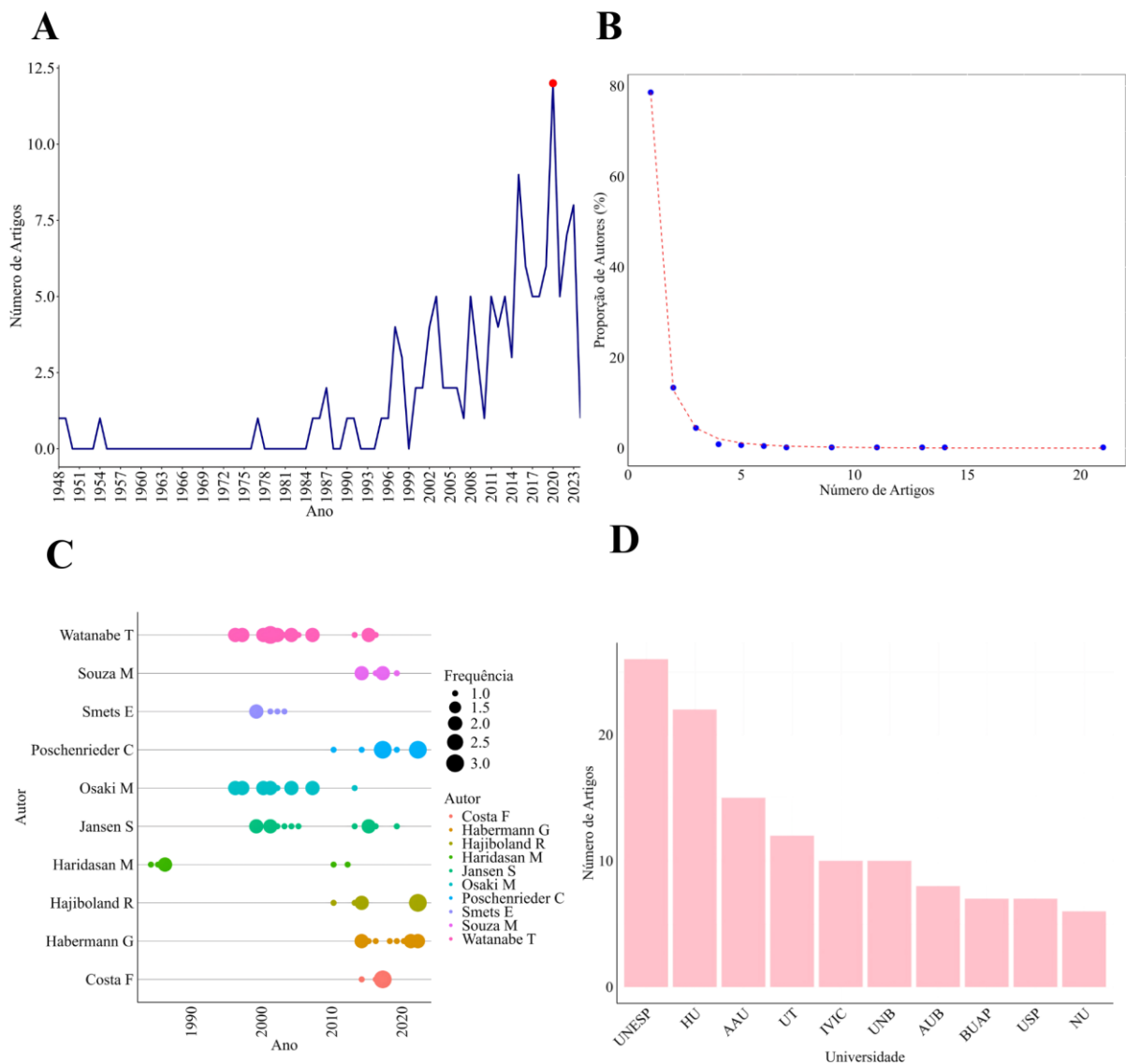
## **Resultados e Discussão**

### **Análise cienciométrica**

A análise realizada identificou 862 documentos publicados nos últimos 76 anos nas principais bases de dados, dos quais 129 atenderam aos critérios de seleção estabelecidos (Tabela S1). O primeiro estudo encontrado foi publicado por Chenery em 1948, mas foi somente em 1997 que se observou o primeiro aumento significativo no número de publicações. O maior pico de publicações ocorreu em 2020, com 12 artigos publicados (Figura 2A), impulsionado pela pandemia de COVID-19 e pelo crescente interesse em questões ambientais. Os estudos foram publicados em um total de 77 periódicos científicos, e os documentos tiveram um total de 250,79 citações por ano. No entanto, a produtividade média por autor é baixa, com uma média de 0,30 publicações por autor, considerando um total de 425 autores. A análise da produtividade dos autores segue a Lei de Lotka, que indica que muitos pesquisadores publicam pouco ou apenas um artigo em determinado período. De fato, 78,6% dos autores publicaram apenas uma vez sobre o tema, e 13,2% publicaram até dois artigos (Figura 2B). Esses dados sugerem que a maioria dos pesquisadores na área realiza publicações de forma esporádica, sem estabelecer uma trajetória de estudos sobre o tema.

Os autores com maior produção científica sobre plantas acumuladoras de alumínio foram Watanabe T., Osaki M. e Jansen S., com 21, 14 e 13 publicações, respectivamente (Figura 2C). Watanabe T. e Osaki M. estão vinculados à Universidade de Hokkaido, no Japão, enquanto Jansen S. está associado à Ulm University, na Alemanha. Embora os pesquisadores mais relevantes sobre o tema estejam na Universidade de Hokkaido, esta instituição ficou em segundo lugar no número de publicações, com 22 artigos (Figura 2D). A instituição com o

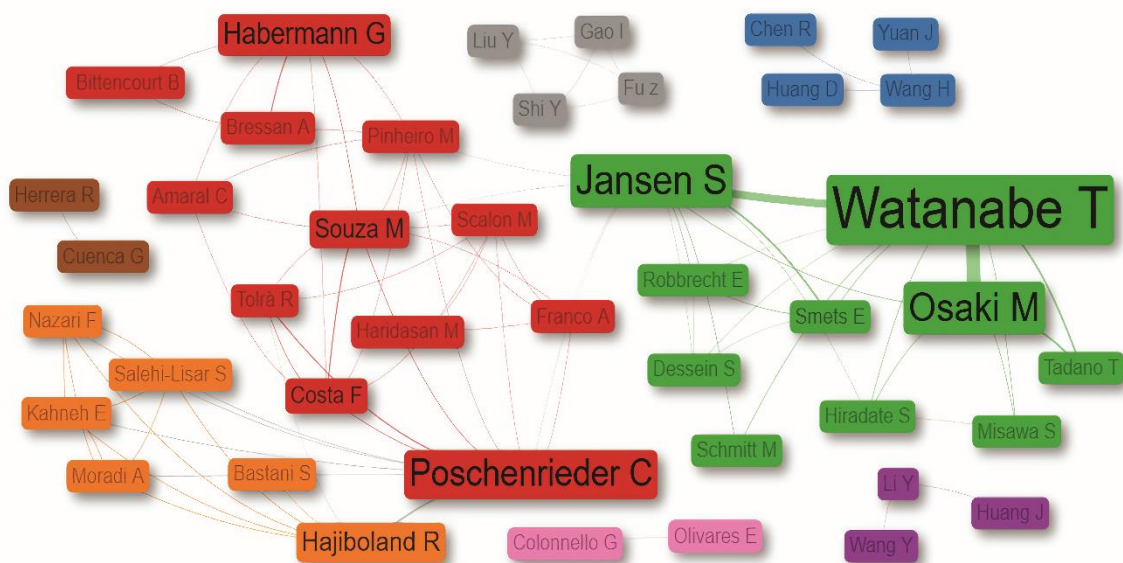
maior número de publicações foi a Universidade Estadual Paulista (UNESP), no Brasil, com 26 artigos. O principal responsável por essa produção foi o pesquisador Habermann G. Em terceiro lugar, ficou a Anhui Agricultural University (UAA), da China, com 15 artigos publicados.



**Figura 2.** Análise cienciométrica da produção científica sobre plantas acumuladoras de alumínio. **A** - Número de artigos publicados por ano entre 1948 e 2024. **B** - Produtividade dos autores segundo a Lei de Lotka, com a linha vermelha tracejada indicando a distribuição esperada conforme o modelo. **C** - Dez autores mais produtivos no período analisado, o tamanho do ponto indica a quantidade de

publicações. **D** - Dez instituições de pesquisas que mais contribuem com estudos de Al-acumuladores. UNESP = Universidade Estadual Paulista. UH = Hokkaido University. AAU = Anhui Agricultural University. UT = University of Tabriz; UNB = Universidade de Brasília. IVIC = Instituto Venezolana de Investigaciones Cientificas. AUB = Benemerita Univ Autonoma Puebla. USP = Universidade de São Paulo. NU = Nagoya University

Assim, o Brasil figura entre os três países que mais desenvolvem pesquisas sobre plantas acumuladoras de Al. Isso é evidenciado na rede de colaboração entre os pesquisadores da área (Figura 3). O Brasil pertence ao grupo vermelho, o mais colaborativo, que reúne o maior número de autores que interagem tanto internamente quanto com outros grupos, tornando-se central na rede de colaboração. Ao todo, foram identificados 8 grupos de colaboração, dos quais três estão interligados, o que reflete a coautoria predominante entre os membros de cada grupo (Figura 3). O grupo verde se destaca por incluir os autores mais citados e com maior centralidade de intermediação, como Watanabe T., Osaki M. e Jansen S. Além disso, Jansen S. colaborou com o grupo vermelho, liderado por Poschenrieder C. e Habermann G., o brasileiro com o maior número de citações na área. Essas redes desempenham um papel crucial no avanço científico, pois aumentam a eficiência da pesquisa e viabilizam o compartilhamento de recursos científicos e tecnológicos (Andrade et al., 2009). Esses resultados indicam que, embora muitos autores publiquem de forma isolada, eles mantêm uma rede de colaboração robusta, tanto interinstitucional quanto intercontinental.



**Figura 3.** Rede de colaboração entre os autores. Retângulos em proposições e com opacidade maior atribuem destaque às relações e à relevância dos autores na área. As diferentes colorações representam

os clusters formados por agrupamentos de autores com características ou conexões mais intensas entre si em comparação com outros autores fora do grupo

Entre os artigos mais citados na área estão os trabalhos escritos por Ma J. et al. (1997), Osaki M. et al. (1997) e Watanabe T. et al. (1998) (Tabela 1). Os autores Watanabe T. e Osaki M. destacam-se novamente pelo número de citações dos trabalhos no campo das plantas acumuladoras de Al, consolidando o Japão como um dos principais centros de pesquisa sobre o tema. Esses documentos foram publicados em periódicos como *Plant Physiology*, *Soil Science and Plant Nutrition* e *Plant and Soil* (Tabela 1), que possuem fatores de impacto 6.6, 1.9 e 3.9, respectivamente, evidenciando sua relevância internacional e a qualidade da pesquisa na área. De acordo com a Lei de Bradford, esses periódicos ocupam a zona central de relevância dentro do campo de estudo. Além disso, o periódico *Plant and Soil* lidera em número de publicações sobre plantas acumuladoras de Al, com 22,07% do total, seguido por *Plant Biology*, *Plant Physiology and Biochemistry* e *Soil Science and Plant Nutrition*, cada um com 5,19% (Tabela S1).

**Tabela 1.** Os 10 artigos mais citados sobre as plantas acumuladoras de alumínio. Dados em ordem decrescente e categorizados em Área de conhecimento, Periódico e Fator de Impacto (FI)

Primeiro autor	Ano	DOI	TC	Área de conhecimento	Revista	FI
Ma J.	1997	10.1104/pp.113.4.1033	257	Fisiologia	Plant Physiology	6.6
Osaki M.	1997	10.1080/00380768.1997.10414782	152	Fisiologia	Soil Science and Plant Nutrition	1.9
Watanabe T.	1998	10.1023/A:1004341415878	119	Fisiologia	Plant and Soil	3.9
Negishi T.	2012	10.1371/journal.pone.0043189	96	Genética	Plos One	2.9
Tolrà R.	2011	10.1007/s10265-010-0344-3	93	Bioquímica	Journal of Plant Research	2.7
Branquinho C.	2007	10.1016/j.envpol.2006.06.034	89	Fisiologia	Environmental Pollution	7.6
Mukhopadhyay M.	2012	10.1007/s10534-012-9576-0	83	Fisiologia	Biometals	4.1
Jansen S.	2002	10.1093/aob/mcf142	81	Taxonomia e Sistemática	Annals of Botany	3.6
Doğanlar Z.	2011	10.1007/s11270-010-0442-9	80	Fisiologia	Water, Air, & Soil Pollution	3.8
Watanabe T.	2004	10.1111/j.1469-8137.2004.01261.x	70	Fisiologia	New Phytologist	8.3

No que tange às áreas de conhecimento em que os artigos foram categorizados, as pesquisas publicadas abrangem principalmente as áreas de fisiologia (67,71%), bioquímica (14,96%) e anatomia vegetal (8,66%), destacando-se como os principais campos de estudo associados às plantas acumuladoras de Al (Tabela 2). Isso se dá historicamente, visto que as

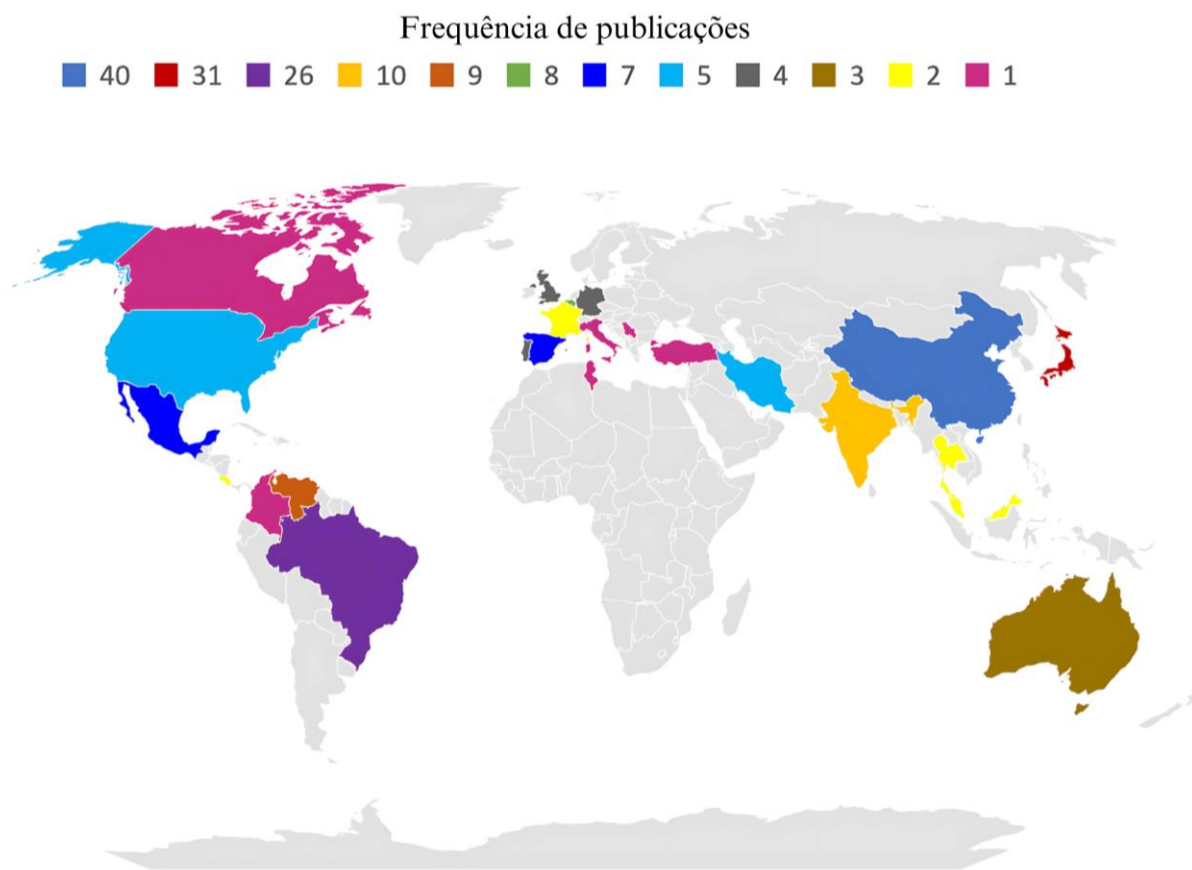
revistas mais relevantes estão nessa área, e os primeiros estudos publicados foram na área da fisiologia vegetal, como Ma et al. (1997) e Osaki et al. (1997). Segundo Jansen et al. (2003) problemas fisiológicos interessantes lidam, por exemplo, com o transporte e a especiação de formas de Al, mecanismos de localização e desintoxicação, o que condiz com os estudos classificados como de natureza fisiológicos neste estudo.

Por outro lado, os estudos bioquímicos e anatômicos podem ser vistos como suporte para os achados fisiológicos. Por exemplo, investigações anatômicas ajudam a entender modificações estruturais decorrentes das respostas fisiológicas ao Al, enquanto os estudos bioquímicos esclarecem as vias metabólicas e os compostos envolvidos no acúmulo e na tolerância ao Al (Kochian et al., 2005; Castro et al., 2022; Hajiboland et al., 2023a).

**Tabela 2.** Distribuição dos artigos em relação a área de conhecimento de interesse dos estudos sobre plantas acumuladoras de alumínio

Área do estudo	Contagem de artigos
<i>Fisiologia</i>	86
<i>Bioquímica</i>	19
<i>Anatomia</i>	11
<i>Genética</i>	6
<i>Taxonomia e Sistemática</i>	6
<i>Morfologia</i>	1

Aliado a esses dados, foi realizado o mapeamento da distribuição global dos estudos sobre plantas acumuladoras de Al. Os resultados mostraram que os países asiáticos foram responsáveis por 51,1% das publicações, seguidos pelas Américas (28,7%), Europa (18,0%), Oceania (1,7%) e África (0,6%) (Figura 4). A China se destacou como a maior produtora de conhecimento na área, aparecendo em 22,47% das publicações analisadas, seguida pelo Japão, com 17,41%, e pelo Brasil, que contribuiu com 14,60%.



**Figura 4.** Distribuição geográfica da produção científica sobre plantas acumuladoras de alumínio no mundo, representada pelas frequências de publicações em cores distintas

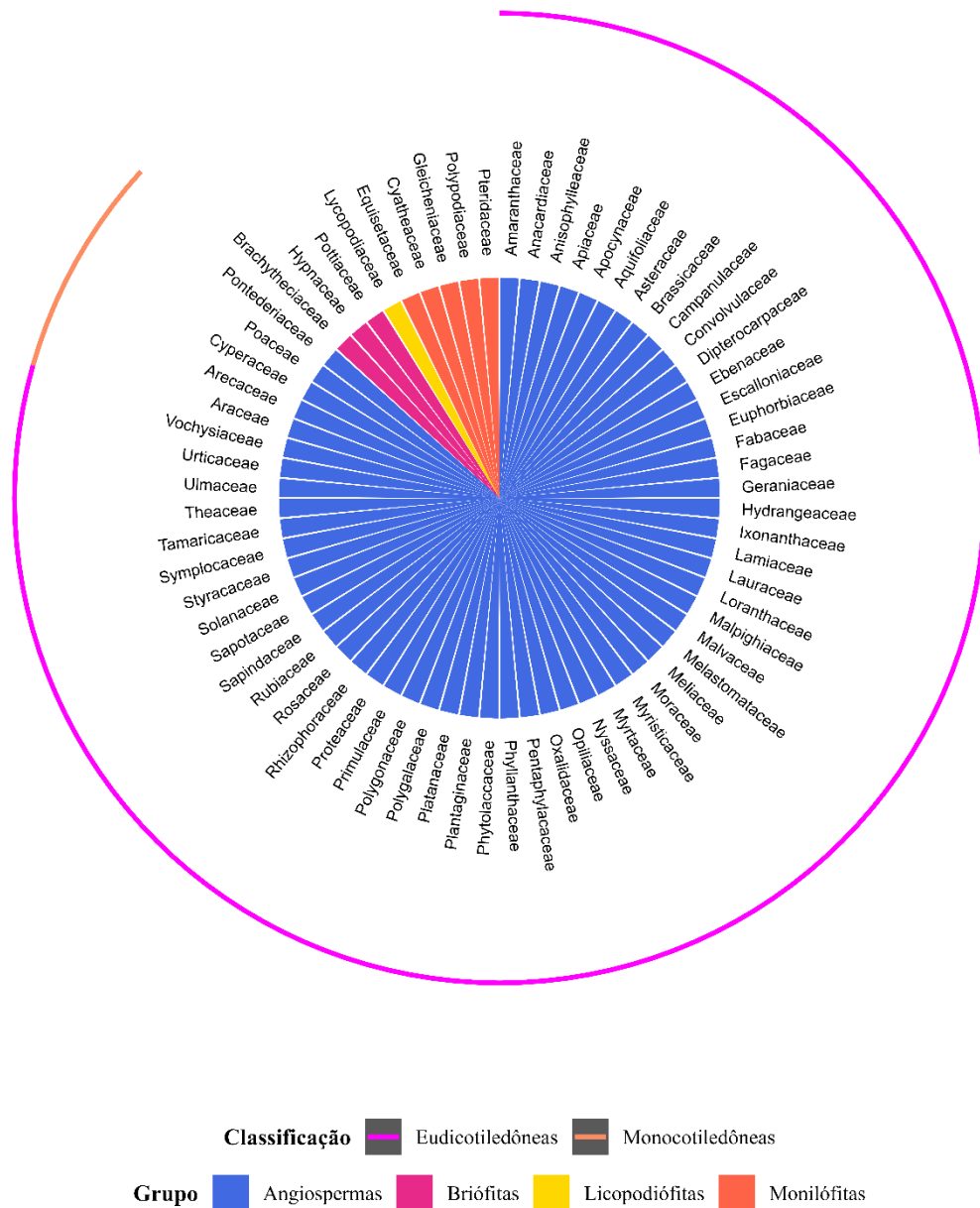
A liderança da China e do Japão na pesquisa pode ser explicada por fatores ambientais e culturais específicos de cada país. A China é, atualmente, um dos principais polos científicos do mundo, ultrapassando os Estados Unidos (Nature, 2021). No país, as pesquisas concentram-se em *Camellia sinensis*, uma hiperacumuladora de Al de grande importância econômica e cultural, favorecida pelas condições agroecológicas locais (Ming & Zhang, 1996; Peel et al., 2007; Zhang et al., 2020, 2021). No Japão, os estudos concentram-se em *Melastoma malabathricum*, também uma hiperacumuladora de Al. Embora não nativa do Japão, essa espécie tem sido amplamente estudada no país, responsável por 60% das publicações sobre ela de forma independente e 40% em colaboração internacional. O interesse por essas espécies reflete desafios ambientais comuns aos dois países, como a acidificação dos solos, que afeta cultivos de arroz, trigo sarraceno e outras culturas devido à presença de Al trocável no solo (Ma et al., 1997; Osaki et al., 1997).

No Brasil, cerca de 76% das publicações nacionais sobre plantas acumuladoras de alumínio estão associadas ao domínio fitogeográfico do Cerrado. Este bioma, conhecido como a "savana brasileira", é o segundo maior do país, ocupando cerca de 21% do território

nacional (Souza & Habermann, 2012). O Cerrado tem sido impactado pela expansão do agronegócio (Carneiro Filho & Costa, 2016; Gazzoni, 2013), e, conforme o MapBiomias (2024), 38 milhões de hectares de sua vegetação nativa foram desmatados entre 1985 e 2023. Dentro das pesquisas realizadas no bioma, as espécies da família Vochysiaceae se destacam como as mais investigadas, sendo todas classificadas como acumuladoras de Al. O fato de o Brasil ocupar a terceira posição mundial em estudos sobre plantas acumuladoras de alumínio reflete a importância do país na produção científica sobre o tema.

### **Mapeamento de plantas Al-acumuladoras**

Foram identificadas 590 espécies de plantas acumuladoras de Al, das quais 222 apresentavam informações completas, incluindo dados sobre acumulação e localização geográfica. Essas espécies estão distribuídas em 68 famílias botânicas, com a maioria alocada na divisão Angiospermas (94,14%), seguida por Monilófitas (4,05%), Briófitas (1,37%) e Licopodiófitas (0,45%) (Tabelas S2 e S3) (Figura 5). A diminuição no número de espécies com dados completos destaca a necessidade de estudos mais aprofundados para consolidar o conhecimento sobre as espécies acumuladoras de Al, especialmente em diferentes grupos botânicos.



**Figura 5.** Distribuição das 68 famílias botânicas identificadas. **Grupo** abrange a categoria geral, enquanto **Classificação** corresponde a característica marcante dentro das famílias

### Criptógamas e Acumulação de Al

O termo "criptógamas" foi introduzido por Linnaeus no século XVIII para designar "vegetais" cuja "frutificação" não é visível a olho nu, englobando grupos como as Briófitas e as plantas vasculares com esporos livres, atualmente classificadas como Monilófitas e Lycopodiófitas (Paula et al., 2007; PPG I, 2016).

A capacidade de acumulação de Al em criptógamas é conhecida há décadas, sendo especialmente documentada em Monilófitas (Church, 1888; Chenery, 1949; Olivares et al.,

2009; Schmitt et al., 2017). Nos bancos de dados analisados, 5,87% dos registros completos referem-se a criptógamas acumuladoras de Al, distribuídas em um total de nove famílias (Tabela S2; Figura 5).

Em briófitas, o conhecimento sobre espécies acumuladoras de Al é limitado. Em nossos dados, foram identificadas apenas três espécies acumuladoras de Al na divisão: *Hypnum cupressiforme* Hedw. (Hypnaceae), *Brachythecium rutabulum* (Hedw.) Schimp. (Brachytheciaceae) e *Barbula unguiculata* Hedw. (Pottiaceae) (Tabela S3) (Hajiboland et al., 2023b). Entre as briófitas, os musgos representam o maior número de acumuladores de Al com (Chenery, 1949; Hajiboland et al., 2023b). Por exemplo, *Barbula unguiculata* (Pottiaceae), um musgo, apresentou o maior valor registrado, com aproximadamente 3.942 g/kg de Al (Hajiboland et al., 2023b). No entanto, devido à escassez de estudos detalhados sobre briófitas acumuladoras de Al, a realização de comparações é limitada, evidenciando lacunas de conhecimento nessa área e apontando para a necessidade de investigações futuras.

Por outro lado, há um maior número de estudos relacionados à acumulação de Al em Monilófitas (samambaias) e Lycopodiófitas (Chenery, 1949; Webb, 1954; Schmitt et al., 2017). Dentre as famílias mais representativas, destacam-se Gleicheniaceae, com quatro espécies identificadas, Lycopodiaceae, com duas espécies, e Polypodiaceae, também com duas espécies (Chen, 2008; Olivares et al., 2009; Liu et al., 2021; Purwadi et al., 2021). A acumulação de Al nessas famílias parece ter evoluído de forma independente em suas linhagens, sendo uma característica rara nos Polypodiaceae, o terceiro grupo com maior número de espécies reconhecidas (Schmitt et al., 2017).

Entre as espécies analisadas, *Sticherus nudus* (Moritz ex Reichardt) Nakai (Gleicheniaceae) apresentou um teor de acumulação de Al de aproximadamente 3.894 g/kg na matéria seca, enquanto *Cyathea gibbosa* (Klotzsch) Domin (Cyatheaceae) registrou 3.616 g/kg, configurando-se como as espécies de samambaias com os maiores teores de Al acumulado (Olivares et al., 2009). Esses resultados indicam que a acumulação de Al não é um evento isolado, mas uma característica adaptativa presente em diferentes linhagens evolutivas de samambaias.

A comparação das médias de acumulação de Al entre os dois maiores grupos de criptógamas de nosso conjunto de dados (briófitas e monilófitas) sugere um potencial semelhante entre as divisões em ambientes com alta disponibilidade desse metal. Essa condição pode também justificar a variação de Al observada entre as famílias, já que não foram detectadas discrepâncias relevantes nos dados. Embora as briófitas apresentem um número menor de representantes e um teor médio de Al inferior ( $2.159 \pm 1.543$  g/kg) em

relação às monilófitas ( $379.083 \pm 1.191$  g/kg), a análise estatística não revelou diferenças significativas entre as médias dos grupos ( $t = -1,0011$ ;  $gl = 9,0001$ ;  $p = 0,3429$ ). Esses resultados indicam que ambos os grupos possuem capacidades equivalentes para acumular Al em condições similares.

### **Fanerógamas e acumulação de Al**

As fanerógamas, também conhecidas como espermatófitas, são plantas que se reproduzem por sementes e incluem dois grandes grupos: gimnospermas e angiospermas. Elas formam a maior parte da biomassa nos ecossistemas naturais terrestres, embora também ocorram em ambientes aquáticos (Durigan et al., 2008; Marques & Creed, 2008). No banco de dados analisado, não houve registro de gimnospermas acumuladoras de alumínio, o que se justifica, uma vez que essa característica é relativamente ausente nesse grupo de plantas (Chenery, 1949).

Por outro lado, as angiospermas correspondem a 94,14% das espécies acumuladoras de Al identificadas no banco de dados, totalizando 209 espécies, distribuídas em 59 famílias botânicas (Figura 5). Aproximadamente, 91,52% estão agrupadas em eudicotiledôneas, enquanto 8,47% dessas famílias pertencem às monocotiledôneas (Figura 5). Esses resultados corroboram os dados apresentados por Chenery em 1949. Apesar do aumento nas pesquisas envolvendo diversas espécies de angiospermas, estima-se que apenas cerca de 5% das eudicotiledôneas e menos de 1% das monocotiledôneas possuem a capacidade de acumular Al (Schmitt et al., 2017). Esses dados reforçam a ideia de que, apesar da grande diversidade das angiospermas, a capacidade de acumular Al é restrita a um subconjunto específico de espécies.

As monocotiledôneas analisadas neste estudo são representadas pelas famílias Araceae, Arecaceae, Cyperaceae, Poaceae e Pontederiaceae. As famílias Poaceae e Cyperaceae são as mais ricas em espécies dentro desta divisão. O primeiro registro de acumulação de Al em Cyperaceae foi realizado por Chenery (1949) em *Eleocharis equisetina*, com 1,45 g/kg de Al. Já nas Poaceae, Jansen et al. (2002a) identificaram a acumulação de Al nos gêneros *Paspalum*, *Setaria* e *Sporobolus*. Em Araceae, Arecaceae e Pontederiaceae, os registros de acumulação de Al são mais escassos, sendo essas famílias representadas por um único indivíduo em nosso conjunto de dados.

A maior concentração de Al entre as monocotiledôneas foi observada em *Andropogon selloanus* (Hack.) (Poaceae), com 4266 g/kg de Al (Mazorra et al., 1987). Entre as demais espécies, teores significativos de Al foram encontrados em *Pontederia crassipes* Mart.

(Pontederiaceae), com 5,0 g/kg, e em *Mauritia flexuosa* L.f. (Arecaceae) e *Pistia stratiotes* L. (Araceae), ambas com 1,795 g/kg de Al acumulado (Mazorra et al., 1987; Veselý et al., 2012; García & Fonseca, 2022).

Esses dados ressaltam a escassez de estudos sobre a acumulação de Al em monocotiledôneas, destacando a necessidade de investigações futuras, especialmente considerando o ciclo de vida rápido dessas plantas e seu papel como pioneiras em processos de sucessão ecológica em ambientes perturbados (Bognounou et al., 2011; Sun et al., 2024). Além disso, monocotiledôneas aquáticas como *Pontederia crassipes* Mart. (Pontederiaceae) e *Pistia stratiotes* L. (Araceae) podem ser valiosas em ambientes contaminados, devido à sua capacidade de absorver Al e outros metais em ecossistemas aquáticos (García & Fonseca, 2022).

Os estudos sobre a acumulação de Al têm se concentrado principalmente em eudicotiledôneas, grupo que, no banco de dados analisado, inclui 54 famílias acumuladoras de Al. Entre as famílias de eudicotiledôneas com maior número de espécies acumuladoras, destacam-se Melastomataceae (39 espécies), Fabaceae (22 espécies) e Rubiaceae (14 espécies), que juntas representam aproximadamente 36,94% das plantas identificadas. Em contraste, 42,59% das famílias detectadas são representadas por apenas uma espécie.

No nível de espécie, as plantas *Urophyllum corymbosum* (Blume) Korth. (40,73 g/kg), *Craterispermum laurinum* (Poir.) Benth. (36,20 g/kg), ambas da família Rubiaceae, e *Desmoscelis villosa* (Aubl.) Naudin (35,29 g/kg), da família Melastomataceae, destacam-se pelos maiores valores de acumulação, caracterizando-se como hiperacumuladoras de Al. Em contrapartida, cerca de 33,99% das espécies analisadas apresentaram concentrações de Al entre 1 e 2 g/kg, com representantes em famílias como *Sapindaceae*, *Sapotaceae* e *Anacardiaceae*. Esses dados indicam uma variação significativa na capacidade de acumulação de Al, com algumas espécies atingindo níveis elevados, enquanto outras apresentam concentrações mais modestas.

Esses resultados também confirmam que as famílias Rubiaceae e Melastomataceae continuam sendo as principais famílias acumuladoras de Al. A família Rubiaceae detém o maior número de espécies acumuladoras de Al registradas na literatura (Jansen et al., 2002b; Jansen et al., 2003). No entanto, o avanço das pesquisas na área tem demonstrado um aumento na relevância da família Melastomataceae, que tem se destacado progressivamente nos estudos relacionados à acumulação de Al, sugerindo uma ampliação do interesse e da importância científica dessa família (Olivares et al., 2010; González-Santana et al., 2012; Arriola et al., 2020).

O registro da família Fabaceae como a segunda mais rica em espécies acumuladoras de Al é de particular relevância, uma vez que, pela primeira vez, um trabalho de revisão sistematiza as informações sobre a acumulação de Al dentro dessa família. Dentre as espécies analisadas, destaca-se *Robinia pseudoacacia* L., com cerca de 19 g/kg de Al na matéria seca (Doğanlar & Atmaca, 2011), seguida por *Chamaecrista repens* (Vogel) com 16 g/kg (Geoghegan & Sprent, 1996) e *Rhynchosia mineira*, com 15 g/kg (Izaguirre-Mayoral et al., 2002). É interessante notar que a maioria dos estudos envolvendo Fabaceae foi conduzido na América Latina (Tabela S3).

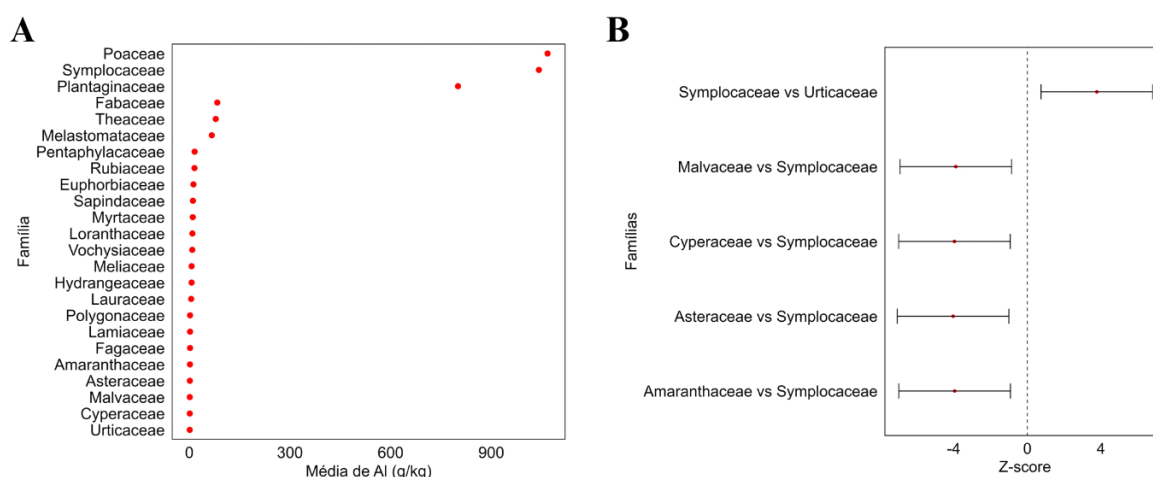
A família Fabaceae está entre as maiores em número de espécies dentro das angiospermas (Christenhusz & Byng, 2016). A família apresenta distribuição cosmopolita e está amplamente representada no Neotrópico (Souza, 2012). Compreende espécies que variam de herbáceas a arbóreas, com grande importância para o consumo humano e animal nas regiões onde ocorrem (Silva et al., 2023). Além de sua relevância alimentar, as Fabaceae se destacam por seu valor medicinal e econômico, devido à variedade de produtos e substâncias obtidas, como medicamentos, óleos, combustíveis, madeira e fibras (Wy, 2019; Maroyi, 2023; Silva et al., 2023). Uma característica marcante é a forte associação da maioria de suas espécies com bactérias fixadoras de nitrogênio, sendo estas fundamentais para a fertilidade do solo e sustentabilidade ambiental (Corby et al., 2011).

Além da família Fabaceae, outras famílias que não são comumente citadas em revisões anteriores como acumuladoras de alumínio incluem, por exemplo, Platanaceae, Plantaginaceae e Sapindaceae. Embora o número de representantes dessas famílias nos dados analisados seja reduzido, sua presença é relevante e merece atenção. Platanaceae e Sapindaceae possuem espécies hiperacumuladoras de Al, como *Platanus orientalis* L. (Platanaceae), com valores médios de acumulação de  $25,69 \pm 8,08$  g/kg de Al, e *Acer negundo* L. (Sapindaceae), com  $29,75 \pm 11,01$  g/kg (Doğanlar & Atmaca, 2011). Na família Plantaginaceae, destaca-se *Plantago almogravensis* Franco, uma espécie endêmica da costa de Portugal que acumula 2400 g/kg de Al, estando atualmente ameaçada de extinção (Branquinho et al., 2007; Serrano et al., 2011). Neste sentido, estes achados reforçam a importância de estudos sobre a acumulação de Al nos diferentes grupos de plantas com flores, possibilitando identificar novas espécies de interesse para aplicações biotecnológicas e estratégias de conservação.

No que tange a análise dos teores médios de acumulação de Al por família nas angiospermas, destacam-se Poaceae ( $1067,81 \pm 2132,12$  g/kg de Al), Symplocaceae ( $1042,11 \pm 2043,25$  g/kg de Al) e Plantaginaceae ( $800,87 \pm 1384,88$  g/kg de Al), que apresentam os

maiores valores de acumulação (Figura 6A). Esses níveis elevados podem estar relacionados tanto à diversidade de espécies presentes nessas famílias quanto à ocorrência de hiperacumuladores de Al em algumas delas (Jansen et al., 2002a).

O teste de comparação de grupos, Kruskal-Wallis, indicou diferença estatisticamente significativa na concentração de Al entre algumas famílias de Al-acumuladores (chi-quadrado = 77.367,  $df = 23$ ,  $p = 0.000$ ). Para esta análise, foram consideradas informações de 24 famílias, mas apenas seis apresentaram diferenças significativas (Figura 6). O teste de Dunn mostrou que a família Symplocaceae apresenta um teor de Al significativamente maior do que as famílias Amaranthaceae, Asteraceae, Cyperaceae, Malvaceae e Urticaceae (Figura 6B). Em relação às famílias Amaranthaceae, Asteraceae, Cyperaceae e Malvaceae, a diferença foi marcadamente negativa, indicando teores de Al muito menores nessas famílias. Para a família Urticaceae, a concentração de alumínio é mais próxima à observada na família Symplocaceae, em comparação com as demais famílias, ainda assim, o teor do metal permanece baixo. Esses resultados destacam a Symplocaceae como a mais eficiente na acumulação de Al entre os grupos analisados.



**Figura 6.** Análise de concentração de alumínio em fanerógamas. A - Dispersão do teor médio de alumínio entre as famílias. B - Comparação em pares das famílias com diferenças significativas na acumulação de alumínio, Z-score representa a diferença padronizada entre as medianas de dois grupos

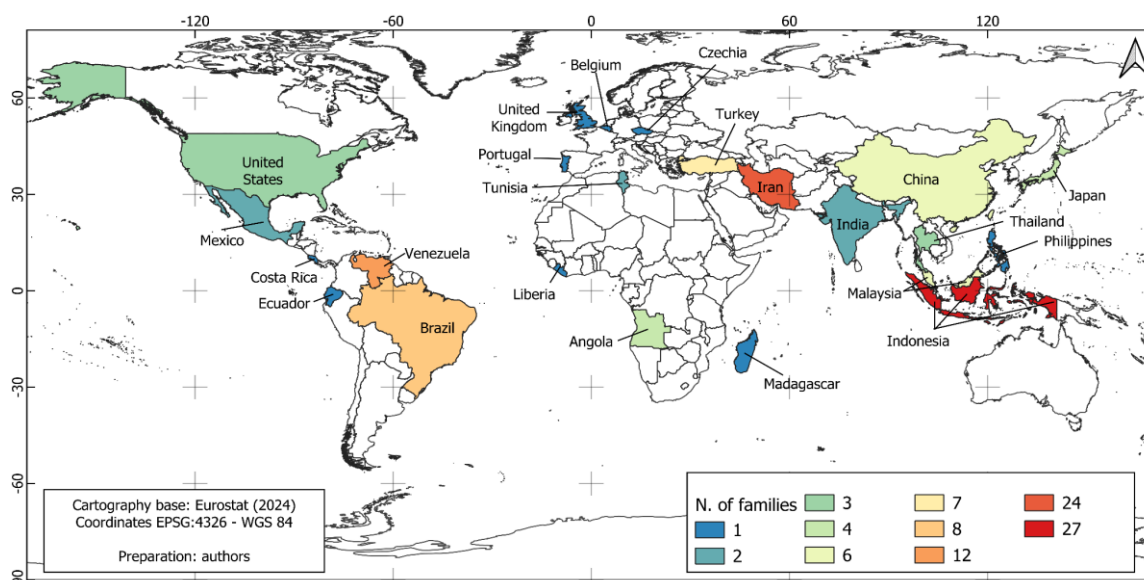
Assim, nas angiospermas, a capacidade de acumulação de Al varia de forma acentuada em alguns grupos específicos, enquanto outras famílias apresentam concentrações mais homogêneas. Além disso, esses resultados destacam não apenas a importância das eudicotiledôneas na acumulação de Al, mas também o papel das monocotiledôneas,

especialmente da família Poaceae, que, apesar de ser menos associada à acumulação de Al, supera famílias tradicionalmente reconhecidas, como a Symplocaceae, reforçando sua relevância entre as plantas analisadas.

### Distribuição geográfica das plantas Al-acumuladoras no mundo e no Brasil

De acordo com os dados analisados, corroborados pelas informações do GBIF, as famílias de plantas acumuladoras de Al estão predominantemente distribuídas nas regiões tropicais do globo, onde solos ácidos representam um desafio e o  $Al^{3+}$  encontra-se disponível para bioacumulação. Brunner e Sperisen (2013) destacam que, em árvores, a absorção e o armazenamento de altas concentrações de  $Al^{3+}$  nas partes aéreas são características comuns a muitas espécies tropicais. Nessas regiões, a capacidade de lidar com o estresse causado pelo Al é um requisito essencial para a sobrevivência das plantas.

Nesse estudo, as plantas acumuladoras de Al foram registradas em quatro dos seis continentes terrestres, com exceção da Oceania e da Antártida (Figura 7). Essas espécies fazem parte da vegetação nativa de 22 países, distribuídos entre a Ásia, Europa, América e África. Dentre esses continentes, o asiático, apresenta o maior número de acumuladores de Al, com 121 espécies e 56 famílias, independentemente da categoria de plantas identificadas. Esse destaque está relacionado, em grande parte, à relevância das florestas tropicais asiáticas para a biodiversidade global, especialmente na Indonésia (Nugroho et al., 2022), que abriga a maior representatividade de espécies (n=57) e de famílias (n=27) de acumuladoras.



**Figura 7.** Distribuição geográfica das famílias acumuladoras de alumínio em diferentes regiões do mundo

Considerando os grupos examinados, as criptógamas acumuladoras de Al estão distribuídas nos continentes asiático e sul-americano, sendo registradas em países como Irã, Malásia, China, Venezuela e Brasil. Em regiões tropicais, como Venezuela, Malásia e partes da China e do Brasil, predominam solos ácidos, assim como em áreas áridas, como o Irã (von Uexküll & Mutert, 1995; Brunner & Sperisen, 2013; Hajiboland et al., 2023b). A distribuição das criptógamas acumuladoras de Al reflete a relação entre o clima e a biodisponibilidade do metal para as plantas.

As briófitas acumuladoras de Al foram registradas exclusivamente no Irã, um país de clima árido. Esse fato sugere que essas espécies desenvolveram mecanismos adaptativos específicos para condições extremas, incluindo solos ácidos (Hajiboland et al., 2023b). Essa adaptação pode ser uma estratégia ecológica voltada para a sobrevivência em habitats com condições ambientais limitantes, evidenciando a importância da interação entre fatores climáticos e a biologia das criptógamas acumuladoras deste metal.

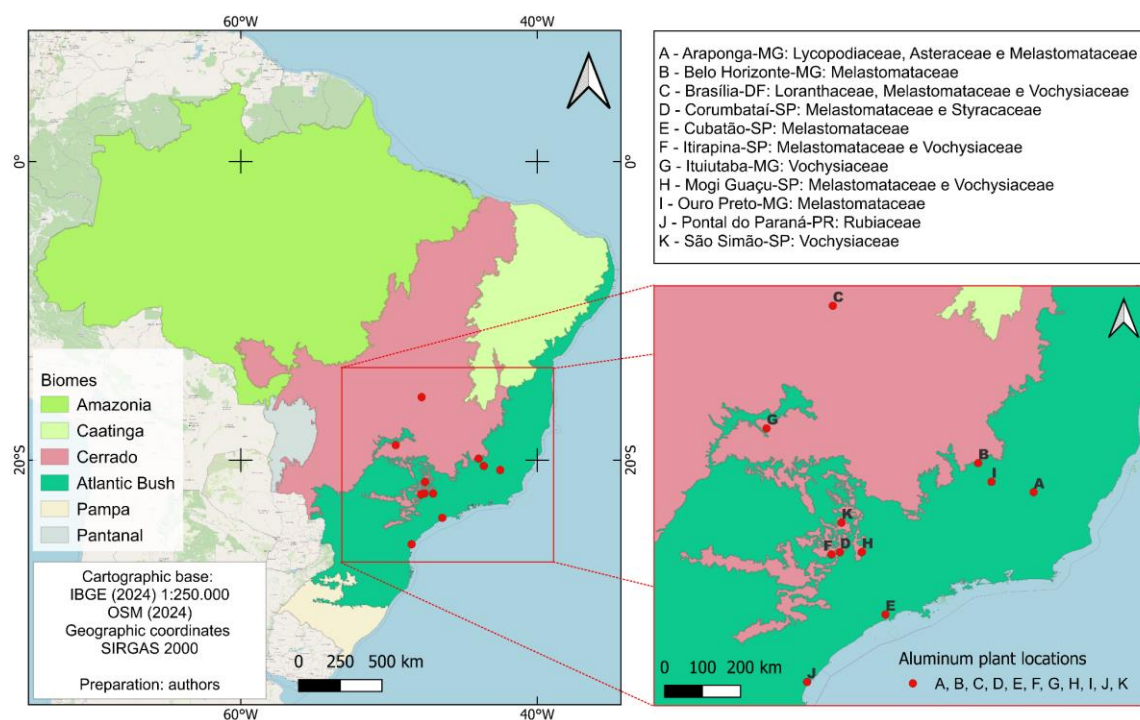
Por outro lado, para as samambaias, Schmitt et al. (2017) observam que elas apresentam maior frequência de acúmulo de Al em regiões tropicais e subtropicais (40% dos espécimes), em comparação com regiões subtropicais-temperadas (32%) ou cosmopolitas (30%). Os dados deste estudo corroboram essa tendência, indicando que 53,33% das plantas de esporos livres acumuladoras de Al estão localizadas em países de clima estritamente tropical, enquanto 15% ocorrem em áreas de clima misto (Brasil e China) e 6,66% em regiões áridas, como o Irã.

Por sua vez, as angiospermas Al-acumuladoras encontram-se principalmente nos países da região geopolítica da Ásia-Pacífico (como Indonésia, Irã, Japão, China, Índia, Tailândia, Malásia e Filipinas), América do Norte e do Sul (EUA, México, Brasil, Venezuela e Equador), Europa (Bélgica, Portugal, República Tcheca, Turquia) e África (Angola, Tunísia, Libéria e Madagascar). Com exceção do Japão, que possui clima predominantemente temperado, e do Irã, árido, todos os demais países asiáticos apresentam grande parte de sua extensão territorial em áreas tropicais. Situação semelhante ocorre nos países da América, onde o clima temperado predomina apenas nos Estados Unidos. Na África, a Tunísia é o único país listado que não possui áreas tropicais, enquanto, na Europa, todos os países mencionados estão inseridos em zonas de clima temperado (Cui et al., 2021; Burgener et al., 2023).

Embora as angiospermas acumuladoras de Al estejam distribuídas em diferentes faixas climáticas, elas são principalmente abundantes em regiões tropicais. A distribuição dessas plantas, assim como no caso das criptógamas, está fortemente associada às condições

climáticas e edáficas, uma vez que os solos tropicais tendem a ser ácidos e favorecem a ocorrência de angiospermas acumuladoras de Al em maior frequência do que os solos de ambientes temperados (Jansen et al., 2002a; Brunner & Sperisen, 2013). Esse padrão reforça a influência das condições edáficas e climáticas na distribuição global das angiospermas acumuladoras deste metal, corroborando os resultados observados neste estudo.

No caso específico do Brasil, as plantas acumuladoras de Al são encontradas em sete unidades federativas, sendo três delas pertencentes à região Sudeste (São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro), duas à região Sul (Paraná e Rio Grande do Sul) e as demais nas regiões Nordeste (Bahia) e Centro-Oeste (Distrito Federal) do país (Figura 8). Ao todo, foram identificadas oito famílias de acumuladoras, das quais 87,5% pertencem às angiospermas, e 12,5%, que equivale a um único representante, pertencente à divisão das licopodiófitas. A região Sudeste apresenta a maior diversidade de famílias acumuladoras de Al, com seis famílias registradas, sendo a família Melastomataceae a mais rica em espécies (7 espécies). A região Centro-Oeste é representada por três famílias, com Loranthaceae e Vochysiaceae apresentando o mesmo número de representantes (3 espécies cada). Já o Nordeste é exclusivamente representado por Fabaceae, enquanto o Sul é representado por Rubiaceae. Entretanto, na Figura 8, os estados da Bahia, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul não são representados devido à falta de informações específicas sobre a localização das espécies estudadas. Por esse motivo, a família Fabaceae também não é especificada na imagem, embora tenha sido coletada nos estados da Bahia, Rio de Janeiro e Minas Gerais.



**Figura 8.** Distribuição das famílias acumuladoras de alumínio no território brasileiro. Unidades Federativas: MG - Minas Gerais. SP - São Paulo. DF - Distrito Federal. PR - Paraná

Segundo o Grupo Flora Do Brasil (BFG, 2021), os estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Bahia são os mais diversos para vários grupos taxonômicos, o que, portanto, justificaria o destaque da região Sudeste para os Al-acumuladores. Das famílias identificadas de plantas acumuladoras de Al, Fabaceae (3.033 espécies), Melastomataceae (1.436 espécies) e Rubiaceae (1.415 espécies) estão entre as 10 famílias de angiospermas mais ricas do Brasil (BFG, 2021), o que evidencia a importância desses achados para o país.

Outro aspecto significativo que pode ser associado à distribuição das plantas acumuladoras de Al no território brasileiro são as características edáficas e climáticas. No país, mais de 500 milhões de hectares de terra são cobertos por solos ácidos, representando cerca de dois terços de seu território total (Vitorello et al., 2005). Com exceção da espécie de Rubiaceae coletada no Rio Grande do Sul, cujas características do solo não são conhecidas, todas as demais foram estudadas em condições de solos ácidos ou na presença de  $Al^{3+}$  (Jansen et al., 2003; Andrade et al., 2011; Arriola et al., 2020). Além disso, as famílias identificadas estão localizadas predominantemente nas extensões territoriais dos domínios fitogeográficos do Cerrado e da Mata Atlântica. Tanto o Cerrado quanto a Mata Atlântica são biomas tropicais, considerados *hotspots* para a conservação da biodiversidade devido ao alto nível de ameaça às suas áreas naturais, à elevada biodiversidade e ao alto grau de endemismo (Myers

et al., 2000; Muniz et al., 2024). Os solos de ambos os biomas são ácidos (Varjabedian & Pagano, 1988; Haridasan, 2008; Joly et al., 2012; Pereira et al., 2018) e, assim como o Cerrado, a Mata Atlântica está sob constante intervenção antrópica. A perda de vegetação nativa na Mata Atlântica foi de 10%, ou seja, 3,7 milhões de hectares nos últimos 39 anos. Com isso, as formações florestais decresceram de 28% para 26% no bioma, enquanto as atividades agropecuárias, por sua vez, passaram de 63% para 65% (Mapbiomas, 2024). Logo, no Brasil, as condições ambientais são variáveis cruciais para a presença de plantas acumuladoras de Al.

### **Conclusão**

Este estudo destaca o progresso no entendimento das plantas acumuladoras de Al, com base na análise cienciométrica e sistemática. A pesquisa revelou que, apesar de uma produção sazonal, os autores formam redes de colaboração integradas entre diversos países, com o Brasil se destacando como um dos maiores produtores de conhecimento na área, liderado pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). As publicações têm alto fator de impacto, com destaque para as áreas de fisiologia, bioquímica e anatomia, refletindo o interesse nos mecanismos relacionados à acumulação de Al.

A distribuição das plantas acumuladoras de alumínio está fortemente associada a regiões tropicais, com destaque para as famílias Melastomataceae, Fabaceae e Rubiaceae. No Brasil, essas plantas estão concentradas principalmente no Sudeste e no Centro-Oeste, com a Melastomataceae sendo a família mais representativa.

Apesar do crescente interesse científico, observa-se uma lacuna significativa de estudos em alguns biomas brasileiros, como a Floresta Amazônica, o que destaca a necessidade de expandir as pesquisas para outras regiões fitogeográficas. A acumulação de Al é um fenômeno complexo, influenciado por fatores climáticos e edáficos, com implicações importantes para o manejo de solos e a preservação de ecossistemas.

**Agradecimentos** Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) pelo financiamento da bolsa de nível mestrado concedida.

## Referências

- Andrade H., E. López & T. Martín. 2009. Dimensions of scientific collaboration and its contribution to the academic research groups' scientific quality. *Research Evaluation*, 18: 301–311. Doi: 10.3152/095820209X451041.
- Andrade, L., L. Barros, G. Echevarria, L. Amaral, M. Cotta, D. Rossatto, M. Haridasan & A. Franco. 2011. Al-Hyperaccumulator Vochysiaceae from the Brazilian Cerrado store aluminum in their chloroplasts without apparent damage. *Env Exp Bot* 70: 37–42. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.05.013.
- Arriola, Í., M. Figueiredo, D. Boaneres, M. França & R. Isaias. 2020. Apoplast-symplast compartmentalization and functional traits of iron and aluminum in promeristematic tissues of nematode induced galls on *Miconia* spp. *Plant Physiol Biochem.*, 154: 360-368. DOI: 10.1016/j.plaphy.2020.06.031.
- BFG. 2021. Brazilian Flora 2020: Leveraging the power of a collaborative scientific network. *TAXON*, 71: 178-198. DOI: 10.1002/tax.12640.
- Bognounou, F., R. Morton, S. Ayangma, L. Jonkers, C. Björkman, H. Bylund, C. Orians, A. Vega & P. Oden. 2011. Stand structure of monocotyledons and dicotyledons in different successional stages in Corcovado National Park, Costa Rica. *Bois et Forêts des Tropiques*, 307(1).
- Bojórquez-Quintal, E., C. Escalante-Magaña, I. Echevarría-Machado & M. Martínez-Estévez. (2017). Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. *Frontiers in Plant Science*, 8(12): 1001. DOI: 10.3389/fpls.2017.01001.
- Branquinho, C., H. Serrano, M. Pinto & M. Martins-Loução. 2007. Revisiting the plant hyperaccumulation criteria to rare plants and earth abundant elements. *Environmental Pollution*, 146(2): 437-443. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.06.034.
- Brunner, I., & C. Sperisen. 2013. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. *Frontiers in Plant Science*, 4: 1–12. DOI: 10.3389/fpls.2013.00172.
- Burgener, L., E. Hyland, B. Reich & C. Escotese. 2023. Cretaceous climates: Mapping paleo-Köppen climate zones using a Bayesian statistical analysis of lithologic, paleontologic, and geochemical proxies. *Palaeoecology*, 613: 111373. DOI: 10.1016/j.palaeo.2022.111373.
- Carneiro Filho, A. & K. Costa. 2016. A expansão da soja no cerrado. Caminhos para a ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável. Agroicone, Input, São Paulo.
- Castro, L., C. Vinson, S. Gordo, T. Williams, N. Cury, M. Souza & L. Pereira. 2022. Molecular and physiological aspects of plant responses to aluminum: what do we know about Cerrado plants? *Revista Brasileira de Botânica*, 45: 545–562. DOI: 10.1007/s40415-022-00751-2.
- Chauhan, D., V. Yadav, M. Vaculík, W. Gassmann, S. Pike, N. Arif, V. Singh, R. Deshmukh, S. Sahi & D. Tripathi. 2021. Aluminum toxicity and aluminum stress-induced physiological tolerance responses in higher plants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41 (5): 715–730. DOI: 10.1080/07388551.2021.1874282.
- Chen, R., R. Shen, P. Gu, H. Wang & X. Xu. 2008. Investigation of Aluminum-Tolerant Species in Acid Soils of South China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(9–10): 1493–1506. DOI: 10.1080/00103620802006610.
- Chenery, E. 1948. Aluminium in the plant world, Part I. *Kew Bulletin*, 3(2): 463-473. Published by Springer on behalf of Royal Botanic Gardens, Kew. Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/4119757>.

- Chenery, E. 1949. Aluminium in the plant world, Part II. *Kew Bulletin*, 3(2): 173–183. Published by Springer on behalf of Royal Botanic Gardens, Kew. <http://www.jstor.org/stable/4119757>.
- Christenhusz, M. & J. Byng. 2016. The number of known plants species in the world and its annual increase. *Phytotaxa*, 261 (3): 201–217. DOI: 10.11646/phytotaxa.261.3.1.
- Church, A. 1888. On the Occurrence of Aluminium in Certain Vascular Cryptogams. *Proc. Roy. Soc. Lond.* 44: 121.
- Corby H., D. Smith & J. Sprent. 2011. Size, structure and nitrogen content of seeds of Fabaceae in relation to nodulation. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 167(3): 251–280. DOI: 10.1111/j.1095-8339.2011.01174.x.
- Cui, D., S. Liang & D. Wang. 2021. Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification. *WIREs Climate Change*, 12(3): 701. DOI: 10.1002/wcc.701.
- Doğanlar, Z. & M. Atmaca. 2011. Influence of Airborne Pollution on Cd, Zn, Pb, Cu, and Al Accumulation and Physiological Parameters of Plant Leaves in Antakya (Turkey). *Water Air Soil Pollut*, 214: 509–523. DOI: 10.1007/s11270-010-0442-9.
- Durigan, G., M. Mamede, N. Ivanauskas, M. Siqueira, C. Joly, C. Moura, F. Barros, F. Souza, F. Vilela, F. Arzolla, G. Franco, I. Cordeiro, I. Koch, J. Baitello, J. Lombardi, et al. 2008. Fanerógamas. In: São Paulo. Diretrizes para a conservação e restauração da biodiversidade do estado de São Paulo. Secretaria do meio ambiente, Instituto de Botânica, FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Programa BIOTA/FAPESP, São Paulo.
- García, T. & R. Fonseca. 2022. Aquatic macrophytes as bioindicators of metals in water reservoirs in Venezuela. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38. DOI: 10.20937/RICA.54119.
- Gautam, A., A. Panda & A. Misra. 2023. Evaluation of Screening Method for Aluminum-Sensitivity Effects on Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) Varieties Grown in Acid/Neutral Soils. *Letters in Applied NanoBioScience*, 12, 4. DOI: 10.33263/LIANBS124.163.
- Gazzoni, D. 2013. A sustentabilidade da soja no contexto do agronegócio brasileiro e mundial. Embrapa Soja, Londrina, Paraná.
- Geoghegan, I., & J. Sprent. 1996. Aluminum and nutrient concentrations in species native to central Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 27(18–20): 2925–2934. DOI: 10.1080/00103629609369752.
- González-Santana, I., J. Márquez-Guzmán, S. Cram-Heydrich & R. Cruz-Ortega. 2012. *Conostegia xalapensis* (Melastomataceae): an aluminum accumulator plant. *Physiologia Plantarum* 144: 134–145. DOI: :10.1111/j.1399-3054.2011.01527.x.
- Hajiboland R., A. Moradi, E. Kahneh, C. Poschenrieder, F. Nazari, J. Pavlovic, R. Tolra, S-Y S-L & M. Nikolic. 2023b. Weed Species from Tea Gardens as a Source of Novel Aluminum Hyperaccumulators. *Plants*, 12: 2129. DOI: 10.3390/plants12112129.
- Hajiboland, R., C.K. Panda, O. Lastochkina, M. A. Gavassi, G. Habermann & J. F. Pereira. 2023a. Aluminum toxicity in plants: Present and future. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42: 3967–3999. DOI: 10.1007/s00344-022-10866-0.

- Haridasan M. 2008. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 20: 183–195. DOI: 10.1590/S1677-04202008000300003.
- Haridasan, M. & G Araújo. 1988. Aluminium-accumulating species in two forest communities in the cerrado region of central Brazil. *For. Ecol. Manage.*, 24: 15-26v. DOI: 10.1016/0378-1127(88)90021-7.
- Izaguirre-Mayoral M., S. Flores & T. Oropeza. 2002. Aluminum tolerance in nodulated N<sub>2</sub>-fixing legumes species native to two contrasting savanna sites. *Plant and Soil*, 245: 163–168. DOI: 10.1023/A:1020666109189.
- Jansen, S., M. Broadley, E. Robbrecht, E. Smets. 2002a. Aluminum hyperaccumulation in angiosperms: A review of its phylogenetic significance. *Botanical Review*, 68(2): 235–269. DOI: 10.1007/BF02858431.
- Jansen, S., T. Watanabe & E. Smets. 2002b. Aluminium Accumulation in Leaves of 127 Species in Melastomataceae, with Comments on the Order Myrtales, *Annals of Botany*, 90: 53–64. DOI: 10.1093/aob/mcf142.
- Jansen, S., T. Watanabe, S. Dessein, E. Smets & E. Robbrecht. 2003. A comparative study of metal levels in leaves of some Al-accumulating Rubiaceae. *Annals of Botany*, 91(6): 657–663. DOI: 10.1093/aob/mcg071.
- Joly, C., M. Assis, L. Bernacci, J. Tamashiro, M. Campos, J. Gomes, M. Lacerda, F. Santos, F. Pedroni, L. Pereira, M. Padgurschi, E. Prata, E. Ramos, R. Torres, A. Rochelle, F. Martins, L. Alves, S. Vieira, L. Martinelli, P. Camargo, M. Aidar, P. Eisenlohr, E. Simões, J. Villani & R. Belinello. 2012. Florística e fitossociologia em parcelas permanentes da Mata Atlântica do sudeste do Brasil ao longo de um gradiente altitudinal. *Biota Neotropica*, 12(1): 1–21. DOI: 10.1590/S1676-06032012000100012.
- Kochian L.V., M.A Piñeros, J. Liu & J.V Magalhães. 2015. Plant Adaptation to Acid Soils: The Molecular Basis for Crop Aluminum Resistance. *Annu Rev Plant Biol.*, 66: 571-98. DOI: 10.1146/annurev-arplant-043014-114822.
- Kochian, L.V., M.A Piñeros & O.A. Hoekenga. 2005. The physiology, genetics, and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant and Soil* 274: 175–195. DOI: 0.1007/s11104-004-1158-7.
- Liu, W., H. Zheng, C. Liu, M. Guo, S. Zhu, Y. Cao, R. Qiu, J. Morel, A. Ent; Y. Tang. 2021. Variation in rare earth element (REE), aluminium (Al) and silicon (Si) accumulation among populations of the hyperaccumulator *Dicranopteris linearis* in southern China. *Plant Soil*, 461: 565–578. DOI: 10.1007/s11104-021-04835-x.
- Ma, J., S. Hiradate, K. Nomoto, T. Iwashita, H. Matsumoto. 1997. Internal Detoxification Mechanism of Al in *Hydrangea* (Identification of Al Form in the Leaves), *Plant Physiology*, 113: 1033–1039. DOI: 10.1104/pp.113.4.1033.
- Mapbiomas. 2024. Em 2023, a perda de áreas naturais no Brasil atinge a marca de 33% do território. <https://brasil.mapbiomas.org/2024/08/21/em-2023-a-perda-de-areas-naturais-no-brasil-atinge-a-marca-historica-de-33-do-territorio/> (Accessed: 10 November 2024).
- Maroyi, A. 2023. Medicinal Uses of the Fabaceae Family in Zimbabwe: A Review. *Plants*, 12(6): 1255. DOI: 10.3390/plants12061255.
- Marques, L. & J. Creed. 2008. Biologia e Ecologia das Fanerógamas Marinhas do Brasil. *Oecol. Bras.*, 12 (2): 315-331. DOI: 10.4257/oeco.2008.1202.12.

- Mazorra, M., J. Jose, R. Montes, J. Miragaya & M. Haridasan. 1987. Aluminium concentration in the biomass of native species of the Morichals (swamp palm community) at the Orinoco Llanos, Venezuela. *Plant Soil*, 102: 275–277. DOI: 10.1007/BF02370716.
- Microsoft Corporation. Microsoft Excel [versão 365]. Redmond: Microsoft Corporation, 2024.
- Ming, T. & W. Zhang. 1996. The evolution and distribution of genus *Camellia*. *Acta Botanica*, 18, 1–13.
- Muniz, A., J. Lemos-Filho & M. Lovato. 2024. Non-adaptedness and vulnerability to climate change threaten *Plathymenia* trees (Fabaceae) from the Cerrado and Atlantic Forest. *Sci Rep* 14: 25611. DOI: 10.1038/s41598-024-75664-y.
- Myers, N., R. Mittermeier, C. Mittermeier, G. Fonseca & J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772): 853-8. DOI: 10.1038/35002501.
- Nature. 2021. Superpowered science: Charting China's research rise. *Nature Index*. DOI: 10.1038/d41586-021-01403-2.
- Nugroho H., F. Nurfatriani, Y. Indrajaya, T. Yuwati, S. Ekawati, M. Salminah, H. Gunawan, S. Subarudi, M. Sallata, M. Allo, et al. 2022. Mainstreaming Ecosystem Services from Indonesia's Remaining Forests. *Sustainability*, 14(19): 12124. DOI: 10.3390/su141912124.
- Olivares, E., E. Peña, E. Marcano, J. Mostacero, G. Aguiar, M. Benítez, & E. Rengifo. 2009. Aluminum accumulation and its relationship with mineral plant nutrients in 12 pteridophytes from Venezuela. *Environmental and Experimental Botany*, 65(1): 132–141. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2008.04.002.
- Olivares, E., G. Colonnello, E. Peña & L. Rodriguez. 2010. Aluminum accumulation in nineteen Melastomataceae species from three contrasting plant formations in acid soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 173: 453–460. DOI: 10.1002/jpln.200900152.
- Osaki, M., T. Watanabe & T. Tadano. 1997. Beneficial effect of aluminum on growth of plants adapted to low pH soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, 43(3): 551–563. DOI: 10.1080/00380768.1997.10414782.
- Paula, E., E. Plastino, E. Oliveira, F. Berchez, F. Chow & M. Oliveira. 2007. Introdução à Biologia das Criptógamas. Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Departamento de Botânica, São Paulo.
- Peel, M., B. Finlayson & T. McMahon. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol Earth Syst Sci.*, 11(5):1633-1644. DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007.
- Pereira C., P. Clode, R. Oliveira & H. Lambers. 2018. Eudicots from severely phosphorus-impooverished environments preferentially allocate phosphorus to their mesophyll. *New Phytologist*, 218: 959–973. DOI: 10.1111/nph.15043.
- Pogue, A.I. & W.J. Lukiw. 2014. The mobilization of aluminum into the biosphere. *Frontiers in Neurology* 5: 262. DOI: 10.3389/fneur.2014.00262.
- PPG I . 2016. A community-derived classification for extant lycophytes and ferns. *Jnl of Sytematics Evolution*, 54: 563-603. DOI: 10.1111/jse.12229.
- Purwadi, I., P. Nkrumah, A. Paul & A. Ent. 2021. Uptake of yttrium, lanthanum and neodymium in *Melastoma malabathricum* and *Dicranopteris linearis* from Malaysia. *Chemoecology*, 31(5): 335-342. DOI: 10.1007/s00049-021-00348-2.
- QGIS Development Team. 2024. *QGIS Geographic Information System* (Version 3.34.10). Open Source Geospatial Foundation Project, United States. <https://qgis.org/> (Downloaded: 2 March 2024).

- R Development Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>. (Downloaded: 2 March 2023).
- Rahman, S.; J. Han, M. Ahmad, M. Ashraf, M. Khaliq, M Yousaf, Y. Wang, G. Yasin, M. Nawaz, K Khan, Z. Du. 2024. Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115791>.
- Schmitt, M., K. Mehlreter, M. Sundue, W. Testo, T. Watanabe & S. Jansen. 2017. The evolution of aluminum accumulation in ferns and lycophytes. *American Journal of Botany*, 104(4): 488–496. DOI: 10.3732/ajb.1600381.
- Serrano, H., M. Pinto, A. Martins-Loução & C. Branquinho. 2011. How does an Al-hyperaccumulator plant respond to a natural field gradient of soil phytoavailable Al?. *Sci Total Environ.*, 409(19): 3749-56. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.06.036.
- Silva, C., M. Sgarbossa, D. Grzybovski & A. Mozzato. 2022. Manual prático para estudos bibliométricos com o uso do Biblioshiny. EDIUPF, Passo Fundo.
- Silva, E., R. Conceição & R. Lima. 2023. Agronomic Importance of the Fabaceae Family: A Systematic Review. *Revista EDUCAmazônia*, 16 (2): 289-301.
- Souza, L. 2012. Guia da biodiversidade de Fabaceae do Alto Rio Negro. Elaboração Projeto Fronteiras: Alto Rio Negro. *Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA*, Manaus-AM.
- Souza, M., G. Habermann. 2012. Towards a new ecophysiological approach to understand citrus crop productivity under abiotic stress mirroring the genetic resources of the Brazilian savannah. In: Hasegawa, H., I.M.dM. Rahman. Water stress. InTech, Croácia.
- Sun, J., R. Chazdon & P. Rundel. 2024. Diversity and Distribution of Monocot Understory Herbs during Tropical Forest Succession in Northeastern Costa Rica. *Diversity* 16(8): 439. DOI: 10.3390/d16080439.
- Sun, L., M. Zhang, X. Liu, Q. Mao, C. Shi, L. Kochian & H. Liao. 2020. Aluminium is essential for root growth and development of tea plants (*Camellia sinensis*). *J Integr Plant Biol.*, 62(7): 984-997. doi: 10.1111/jipb.12942.
- Timpone, L. & G. Habermann. 2022. Is aluminum (Al) eliminated by senescent structures of *Miconia albicans*, an Al-accumulating species from Brazilian savanna? *Flora* 289: 152036. DOI: 10.1016/j.flora.2022.152036.
- Varjabedian, R., & S. Pagano. 1988. Produção e decomposição de folheto em um trecho de Mata Atlântica de encosta no município do Guarujá, SP. *Acta Botanica Brasilica*, 2: 243–256. DOI: 10.1590/S0102-33061987000300023.
- Veselý, T., L. Trakal, M. Neuberg, J. Száková, O. Drábek, V. Tejnecký, M. Balíková & P. Tlustoš. 2012. Removal of Al, Fe and Mn by *Pistia stratiotes* L. and its stress response. *Cent.eur.j.biol.*, 7: 1037–1045. DOI: 10.2478/s11535-012-0099-z.
- Vitarello, V., F. Capaldi & V. Stefanuto. 2005. Recent advances in aluminum toxicity and resistance in higher plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1): 129–143. DOI: 10.1590/S1677-04202005000100011.
- Von Uexküll, H., & E. Mutert. 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil* 171: 1–15. DOI: 10.1007/BF00009558.

- Webb, L.J. 1954. Aluminium Accumulation in the Australian - New Guinea Flora. *Australian Journal of Botany*, 2(2): 176 – 196. DOI: 10.1071/BT9540176.
- Wy B. 2019. The diversity and multiple uses of southern African legumes. *Australian Systematic Botany*, 32: 519–546. DOI: 10.1071/SB19028.
- Zhang, Y., Q. Meng, Y. Wang, X. Zhang, & W. Wang. 2020. Climate change-induced migration patterns and extinction risks of Theaceae species in China. *Ecology and Evolution*, 10: 4352–4361. DOI: 10.1002/ece3.6202.
- Zhang, Z., Y. Yang, P. Ye, J. Ma & H. Ye. 2021. The Complete Chloroplast Genome Sequence of *Camellia rostrata* S. X. Yang & S. F. Chai (Theaceae), a Critically Endangered Yellow *Camellia* from Southwest China. *Mitochondrial DNA B Resour.* 6: 2427–2429. DOI: 10.1080/23802359.2021.1955028.

## Material Suplementar

**Tabela S1.** Lista dos artigos analisados na cienciometria e revisão sistemática. TC = Total de citações; FI = Fator de Impacto.

Autores	Título do artigo	Ano	DOI	TC	Área de conhecimento	Revista	FI	Ano do FI
Bressan, A.; Bittencourt, B.; Silva, G. & Habermann, G.	Could the absence of aluminum (Al) impair the development of an Al-accumulating woody species from Brazilian savanna?	2021	10.1007/s40626-021-00216-y	9	Fisiologia	Theoretical and Experimental Plant Physiology	2.2	2023
Schmitt, M.; Mehlreter, K.; Sundue, M.; Testo, W. ; Watanabe, T. & Jansen, S.	The evolution of aluminum accumulation in ferns and lycophytes	2017	10.3732/ajb.1600381	16	Fisiologia	American Journal of Botany	2.4	2023
Nazari, F.; Hajiboland, R.; Salehi-Lisar, S.; Kahneh, E.; Moradi, A. & Poschenrieder, C.	Aluminum accumulation and tolerance in four <i>Amaranthus</i> species	2023	10.37427/botcro-2023-006	0	Fisiologia	Acta Botanica Croatica	1.1	2023
Hajiboland, R.; Bastani, S.; Bahrami-Rad, S. & Poschenrieder, C.	Interactions between aluminum and boron in tea ( <i>Camellia sinensis</i> ) plants	2015	10.1007/s11738-015-1803-1	22	Fisiologia	Acta Physiol Plant	2.4	2023
Ruan, J. & Wong, J.	Aluminium absorption by intact roots of the Al-accumulating plant <i>Camellia sinensis</i> L.	2004	10.1051/agro:2004012	9	Fisiologia	Agronomie	0.863	2006

Campos, N.; Pereira, T.; Machado, M.; Guerra, M.; Tolentino, G.; Araújo, J.; Rezende, M.; Silva, M. & Schaefer, C.	Evolution of micro Energy dispersive X-ray fluorescence and histochemical tests for aluminium detection in plants from High Altitude Rocky Complexes, Southeast Brazil	2014	10.1590/0001-3765201402012	8	Anatomia	Anais da Academia Brasileira de Ciências	-	-
Souza, M., Buono, P.; Morellato, L. & Habermann, G.	Ecological strategies of Al-accumulating and non-accumulating functional groups from the cerrado sensu stricto	2014	10.1590/0001-3765201520140222	24	Fisiologia			
Hotta, H.; Wang, Q.; Fukuda, M.; Aizawa, S.; Umemura, T.; Sekizawa, K. & Tsunoda, K.	Identification of Aluminum Species in an Aluminum-accumulating Plant, <i>Hydrangea (Hydrangea macrophylla)</i> , by Electrospray Ionization Mass Spectrometry	2008	10.2116/analsci.24.795	10	Fisiologia	Analytical Sciences	1.8	2023
Jansen, S.; Watanabe, T.; Dessein, S.; Smets, E. & Robbrecht, E.	A Comparative Study of Metal Levels in Leaves of Some Al-accumulating Rubiaceae	2003	10.1093/aob/mcg071	51	Fisiologia			
Jansen, S.; Watanabe, T. & Smets, E.	Aluminium Accumulation in Leaves of 127 Species in Melastomataceae, with Comments on the Order Myrtales	2002	10.1093/aob/mcf142	81	Taxonomia e Sistemática	Annals of Botany	3.6	2023
Jansen, S.; Dessein, S.; Piesschaert, F.; Robbrecht, E. & Smets, E.	Aluminium Accumulation in Leaves of Rubiaceae: Systematic and Phylogenetic Implications	2000	10.1006/anbo.1999.1000	44	Taxonomia e Sistemática			
Mahmud, K. & Burslem, D.	Contrasting growth responses to aluminium addition among populations of the aluminium accumulator <i>Melastoma malabathricum</i>	2020	10.1093/aobpla/plaa049	2	Fisiologia	AoB PLANTS	2.6	2023
Schmitt, M.; Watanabe, T. & Jansen, S.	The effects of aluminium on plant growth in a temperate and deciduous aluminium accumulating species	2016	10.1093/aobpla/plw065	56	Fisiologia			

Panzo, M.; Afonso, F.; Neinhuis, C. & Feger, K.	Metal Accumulation Properties of Eight Traditionally Utilized Nutritional Plants and Their Potential as Suitable Crops for Cultivation on Acidic Soils of the Northern Province Uíge, Angola	2022	10.3390/app12020792	4	Fisiologia	Applied Sciences	2.5	2023
Chenery, E.	Aluminium in the Plant World. Part I, General Survey in Dicotyledons	1948	10.2307/4119757		Taxonomia e Sistemática			
						Kew Bulletin	0.9	2023
Chenery, E.	Aluminium in the Plant World. Part III, Monocotyledons and Gymnosperms	1949	10.2307/4109057		Taxonomia e Sistemática			
Dash, K.; Manjusha, R.; Thangavel, S. & Arunachalam, J.	UV Photolysisassisted Digestion of Tea Icamellia Sinensis and Tulsi Iocimum Sanctumi And Their Infusions Comparison Of Available Trace Elements	2008	-	10	Fisiologia	Atomic Spectroscopy	3.4	2023
Webb, L.	Aluminium Accumulation In The Australian - New Guinea Flora	1953	10.1071/BT9540176	62	Fisiologia	Australian Journal of Botany	0.9	2023

Toyama-Kato, Y.; Yoshida, K.; Fujimori, E.; Haraguchi, H.; Shimizu, Y. & Kondo, T.	Analysis of metal elements of <i>Hydrangea</i> sepals at various growing stages by ICP-AES	2003	10.1016/S1369-703X(02)00220-6	24	Fisiologia	Biochemical Engineering Journal	3.7	2023
Nazari, F.; Hajiboland, R.; Salehi-Lisar, S.; Kahneh, E.; Moradi, A. & Poschenrieder, C.	Aluminum accumulation in <i>Amaranthus</i> species and mechanisms of Al tolerance	2023	10.1007/s11756-023-01348-z	1	Fisiologia	Biologia	1.4	2023
Martins, N.; Gonçalves, S. & Romano, A.	Metabolism and aluminum accumulation in <i>Plantago almogravensis</i> and <i>P. algarbiensis</i> in response to low pH and aluminum stress	2013	10.1007/s10535-012-0271-3	26	Fisiologia	Biologia Plantarum	0.8	2023
Hajiboland, R.; Bahrami-Rad, S. & Bastani, S.	Aluminum alleviates boron-deficiency induced growth impairment in tea plants	2014	10.1007/s10535-014-0425-6	12	Bioquímica			
Grevenstuck, T.; Moing, A.; Maucourt, M.; Deborde, C. & Romano, A.	Aluminium stress disrupts metabolic performance of <i>Plantago almogravensis</i> plantlets transiently	2015	10.1007/s10534-015-9884-2	2	Bioquímica			
Mukhopadyay, M.; Bantawa, P.; Das, A.; Sarkar, B.; Bera, B.; Ghosh, P. & Mondal, T.	Changes of growth, photosynthesis and alteration of leaf antioxidative defence system of tea [ <i>Camellia sinensis</i> (L.) O. Kuntze] seedlings under aluminum stress	2012	10.1007/s10534-012-9576-0	83	Fisiologia	Biometals	4.1	2023

Huang, D.; Mao, Y.; Guo, G.; Ni, D. & Chen, L.	Genome-wide identification of PME gene family and expression of candidate genes associated with aluminum tolerance in tea plant ( <i>Camellia sinensis</i> )	2022	10.1186/s12870-022-03686-7	9	Genética	BMC Plant Biology	4.3	2023
Maejima, E.; Hiradate, S.; Jansen, S.; Osaki, M. & Watanabe, T.	Comparative analysis of aluminum accumulation in leaves of three angiosperm species	2014	10.1139/cjb-2013-0298	8	Fisiologia			
Olivares, E.; Benítez, M.; Peña, E. & Colonnello, G.	Aluminum accumulation and nutrients in <i>Pterolepis glomerata</i> , <i>Desmoscelis villosa</i> , and <i>Rhynchanthera grandiflora</i> in palm swamp communities	2013	10.1139/cjb-2012-0228	2	Fisiologia	Botany	1.0	2023
Watanabe, T.; Misawa, S. & Osaki, M.	Aluminum accumulation in the roots of <i>Melastoma malabathricum</i> , an aluminum-accumulating plant	2006	10.1139/b05-111	18	Fisiologia	Canadian Journal of Botany	1.397	2009
Veselý, T.; Trakal, L.; Neuberger, M.; Száková, J.; Drake, O.; Tejnecký, V.; Balíková, M. & Tlustoš, P.	Removal of Al, Fe and Mn by <i>Pistia stratiotes</i> L. and its stress response	2012	10.2478/s11535-012-0099-z	9	Fisiologia	Central European Journal of Biology	1.016	2016

Castro, L. & Molina, L.	Determination of the Degree of Accumulation of Heavy Metals in Macrophytes from the Bogota River in Colombia	2019	10.3303/CET1974044	1	Fisiologia	Chemical Engineering Transactions	-	-
Purwadi, I.; Nkrumah, P.; Paul, L. & Ent, A.	Uptake of yttrium, lanthanum and neodymium in <i>Melastoma malabathricum</i> and <i>Dicranopteris linearis</i> from Malaysia	2021	10.1007/s00049-021-00348-2	6	Fisiologia	Chemoecology	1.6	2023
Liu, C.; Liu, W.; Ent, A.; Morel, J.; Zheng, H.; Wang, G.; Tang, Y. & Qiu, R.	Simultaneous hyperaccumulation of rare earth elements, manganese and aluminum in <i>Phytolacca americana</i> in response to soil properties	2021	10.1016/j.chemosphere.2021.131096	27	Fisiologia			
Karak, T.; Sonar, I.; Paul, R.; Frankowski, M.; Boruah, R.; Dutta, A. & Das, D.	Aluminium dynamics from soil to tea plant ( <i>Camellia sinensis</i> L.): Is it enhanced by municipal solid waste compost application?	2015	10.1016/j.chemosphere.2014.08.067	36	Fisiologia	Chemosphere	8.1	2023
Fung, K.; Carr, H.; Poon, B. & Wong, M.	A comparison of aluminum levels in tea products from Hong Kong markets and in varieties of tea plants from Hong Kong and India	2009	10.1016/j.chemosphere.2009.01.003	51	Bioquímica			
Chen, R.; Shen, R.; Gu, P.; Wang, H. & Xu, X.	Investigation of Aluminum-Tolerant Species in Acid Soils of South China	2008	10.1080/00103620802006610	17	Fisiologia	Communications in Soil Science and Plant Analysis	1.3	2023

Geoghegan, I. & Sprent, J.	Aluminum and Nutrient Concentrations in Species Native to Central Brazil	1996	10.1080/00103629609369752	21	Fisiologia			
Miranda, A.; Gomes, B.; Echevarria, G.; Amaral, L.; Cotta, M.; Rossatto, D.; Haridasan, M. & Franco A.	Al-hyperaccumulator Vochysiaceae from the Brazilian Cerrado store aluminum in their chloroplasts without apparent damage	2011	10.1016/j.envexpbot.2010.05.013	49	Anatomia			
Souza, M.; Scalon, M.; Poschenrieder, C.; Tolrà, R.; Venâncio, T.; Teixeira S. & Costa F.	Mechanisms of storage and detoxification of Al in two tropical mistletoes	2018	10.1016/j.envexpbot.2018.03.004	8	Fisiologia	Environmental and Experimental Botany	4.5	2023
Olivares, E.; Peña, E.; Marcano, E.; Mostacero, J.; Aguiar, G.; Benítez, M. & Rengifo, E.	Aluminum accumulation and its relationship with mineral plant nutrients in 12 pteridophytes from Venezuela	2009	10.1016/j.envexpbot.2008.04.002	50	Fisiologia			
Branquinho, C.; Serrano, H.; Pinto, M. & Martins, M.	Revisiting the plant hyperaccumulation criteria to rare plants and earth abundant elements	2007	10.1016/j.envpol.2006.06.034	89	Fisiologia	Environmental Pollution	7.6	2023
Ma, L. & Yang, S.	Growth and physiological response of <i>Kandelia obovata</i> and <i>Bruguiera sexangula</i> seedlings to aluminum stress	2022	10.1007/s11356-021-17926-0	4	Fisiologia	Environmental Science and Pollution Research	-	2023

Saminathan, T.; Malkaram, A.; Patel, D.; Taylor, K.; Hass, A.; Nimmakayala, P.; Huber, D. & Reddy, U.	Transcriptome Analysis of Invasive Plants in Response to Mineral Toxicity of Reclaimed Coal-Mine Soil in the Appalachian Region	2015	10.1021/acs.est.5b01901	11	Bioquímica	Environmental Science and Technology	10.9	2023
Sghaier, D.	Comparative physiology of <i>Arthrocnemum indicum</i> and <i>Tamarix gallica</i> under aluminum alone or combined with NaCl	2023	10.1007/s41207-023-00408-9	0	Fisiologia	Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration	1.8	2023
Nadkarni, R. & Chaphekar, S.	A plant species of suspected accumulator behaviour	1976	10.1007/BF01936737	3	Fisiologia	Experientia	2.072	1998
Timpone, L. & Habermann, G.	Is aluminum (Al) eliminated by senescent structures of <i>Miconia albicans</i> , an Al-accumulating species from Brazilian savanna?	2022	10.1016/j.flora.2022.152036	2	Fisiologia	Flora	1.7	2023
Medina, E.; Cuevas, E. & Lugo, A.	Substrate Chemistry and Rainfall Regime Regulate Elemental Composition of Tree Leaves in Karst Forests	2017	10.3390/f8060182	10	Fisiologia	Forest	2.4	2023
Lu, J.; Qu, X.; Li, J.; Li, Z. & Yuan, J.	Characteristics of Aluminum Accumulation and Distribution in Leaves of Different Ages in <i>Camellia oleifera</i>	2023	10.3390/f14122322	0	Fisiologia			

Fan, Y.; Ouyang, Y.; Pan, Y.; Hong, T.; Wu, C. & Lin, H.	Effect of aluminum stress on the absorption and transportation of aluminum and macronutrients in roots and leaves of <i>Aleurites montana</i>	2020	10.1016/j.foreco.2019.117813	7	Fisiologia	Forest Ecology and Management	3.7	2023
Ramírez, V.; Baez, A.; López, P.; Bustillos, R.; Villalobos, M.; Carreño, R.; Contreras, J.; Muñoz-Rojas, J.; Fuentes, L.; Martínez, J. & Munive, J.	Chromium Hyper-Tolerant <i>Bacillus</i> sp. MH778713 Assists Phytoremediation of Heavy Metals by Mesquite Trees ( <i>Prosopis laevigata</i> ).	2019	10.3389/fmicb.2019.01833	41	Fisiologia	Frontiers in Microbiology	4.0	2023
Rehmus, A.; Bigalke, M.; Boy, J.; Valarezo, C. & Wilcke, W.	Aluminum cycling in a tropical montane forest ecosystem in southern Ecuador	2017	10.1016/j.geoderma.2016.11.002	5	Fisiologia	Geoderma	5.6	2023
Zheng, P.; Ito, T.; Aoki, D.; Sato, S.; Yoshida, M.; Sano, Y.; Matsushita, Y.; Fukushima, K. & Yoshida, K.	Determination of inorganic element distribution in the freeze-fixed stem of Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> -treated <i>Hydrangea macrophylla</i> by TOF-SIMS and ICP-AES	2017	10.1515/hf-2016-0149	8	Fisiologia	Holzforschung	2.2	2023
Devi, S.; Saha, B.; Awasthi, J.; Regon, P. & Panda, S.	Redox status and oxalate exudation determines the differential tolerance of two contrasting varieties of 'Assam tea' [ <i>Camelia sinensis</i> (L.) O. Kuntz] in response to aluminum toxicity	2020	10.1007/s13580-020-00241-x	11	Fisiologia	Horticulture Environment and Biotechnology	2.5	2023

Jansen, S.; Robbrecht, E.; Beeckman, H. & Smets, E.	Aluminium Accumulation In Rubiaceae: An Additional Character For The Delimitation Of The Subfamily Rubioideae?	2000	10.1163/22941932-90000245	14	Taxonomia e Sistemática	IAWA Journal	1.4	2023
Zhou, J.; Ai, Z.; Wang, H.; Niu, G. & Yuan, J.	Phosphorus Alleviates Aluminum Toxicity in <i>Camellia oleifera</i> Seedlings	2019	10.17957/IJAB/15.0886	14	Fisiologia	International Journal of Agriculture and Biology	0.822	2019
Ramírez, V.; Lopez, D.; Quintero- Hernande, V.; López, P.; Juárez, G.; Martínez, J.; Munive, J. & Baez, A.	Ionomic analysis of <i>Prosopis laevigata</i> response to heavy metals: phytoremediation potential determined by wavelength- dispersive X-ray fluorescence	2024	10.1007/s13762-023-05297-7	0	Anatomia	International Journal of Environmental Science and Technology	3.0	2023
<b>Chen, Y.; Wang, M. &amp; Huang, P.</b>	Catechin Transformation as Influenced by Aluminum	2006	10.1021/jf051926z	28	Bioquímica	Journal of Agricultural and Food Chemistry	5.7	2023
Fu, Z.; Jiang, X.; Li, W.; Shi, Y.; Lai, S.; Zhuang, J.; Yao, S.; Liu, Y.; Hu, J.; Gao, L. & Xia, T.	Proanthocyanidin–Aluminum Complexes Improve Aluminum Resistance and Detoxification of <i>Camellia sinensis</i>	2020	10.1021/acs.jafc.0c01689	22	Bioquímica			

Fu, Z.; Jiang, X.; Kong, D.; Chen, Y.; Zhuang, J.; Han, M.; Shi, Y.; Lai, S.; Liu, Y.; Gao, L. & Xia, T.	Flavonol–Aluminum Complex Formation: Enhancing Aluminum Accumulation in Tea Plants	2022	10.1021/acs.jafc.2c04963	4	Fisiologia			
Kutty, A. & Al-Mahaqeri, S.	An Investigation of the Levels and Distribution of Selected Heavy Metals in Sediments and Plant Species within the Vicinity of Ex-Iron Mine in Bukit Besi	2016	10.1155/2016/2096147	29	Fisiologia	Journal of Chemistry	2.8	2023
Naumann, A. & Horst, W.	Effect of aluminium supply on aluminium uptake, translocation and blueing of <i>Hydrangea macrophylla</i> (Thunb.) Ser. cultivars in a peatclay substrate	2003	10.1080/14620316.2003.11511651	28	Fisiologia	Journal of Horticultural Science & Biotechnology	1.7	2023
Tolrà, R.; Marto, S.; Hajibolan, R. & Poschenriede, C.	Aluminium alters mineral composition and polyphenol metabolism in leaves of tea plants ( <i>Camellia sinensis</i> )	2020	10.1016/j.jinorgbio.2019.110956	21	Bioquímica	Journal of Inorganic Biochemistry	3.8	2023
Olivares, E.; Colonnello, G.; Peña, E. & Rodríguez, L.	Aluminum accumulation in nineteen Melastomataceae species from three contrasting plant formations in acid soils	2010	10.1002/jpln.200900152	8	Fisiologia	Journal of Plant Nutrition and Soil Science	2.6	2023
Tolrà, R.; Vogel-Mikuš, K.; Hajiboland, R.; Kump, P.; Pongrac, P.; Kaulich, B.; Gianoncelli, A.; Babin, V.; Barceló, J.; Regvar, M. & Poschenrieder, C.	Localization of aluminium in tea ( <i>Camellia sinensis</i> ) leaves using low energy X-ray fluorescence spectro-microscopy	2011	10.1007/s10265-010-0344-3	93	Bioquímica	Journal of Plant Research	2.7	2023

Liu, Y.; Tao, J.; Cao, J.; Zeng, Y.; Li, X.; Ma, J.; Huang, Z.; Jiang, M. & Sun L.	The Beneficial Effects of Aluminum on the Plant Growth in <i>Camellia japonica</i>	2020	10.1007/s42729-020-00251-9	13	Fisiologia	Journal of Soil Science and Plant Nutrition	3.4	2023
Niu, H.; Peng, C.; Zhu, X.; Dong, Y.; Li, Y.; Tang, L.; Wan, X. & Cai, H.	Positron-emitting tracer imaging of fluoride transport and distribution in tea plant	2020	10.1002/jsfa.10367	5	Fisiologia	Journal of the Science of Food and Agriculture	3.3	2023
Camacho, M.; Alvarado, A. & Fernández-Moya, J.	<i>Vochysia guatemalensis</i> Donn. Smith, an alternative species for reforestation on acid tropical soils	2016	10.1007/s11056-016-9527-7	3	Fisiologia	New Forests	1.9	2023
Watanabe, T.; Misawa, S.; Hiradate, S. & Osaki, M.	Characterization of root mucilage from <i>Melastoma malabathricum</i> , with emphasis on its roles in aluminum accumulation	2008	10.1111/j.1469-8137.2008.02397.x	37	Fisiologia			
Watanabe, T.; Jansen, S. & Osaki, M.	The beneficial effect of aluminium and the role of citrate in Al accumulation in <i>Melastoma malabathricum</i>	2004	10.1111/j.1469-8137.2004.01261.x	70	Fisiologia	New Phytologist	8.3	2023
Britez, R.; Watanabe, T.; Jansen, S.; Reissmann, C. & Osaki, M.;	The relationship between aluminium and silicon accumulation in leaves of <i>Faramea marginata</i> (Rubiaceae)	2002	10.1046/j.1469-8137.2002.00531.x	58	Fisiologia			
Zeng, Q.; Chen, R.; Zhao, X.; Wang, H. & Shen, R.	Aluminium Uptake and Accumulation in the Hyperaccumulator <i>Camellia Oleifera</i> Abel.	2011	10.1016/S1002-0160(11)60136-7	23	Fisiologia	<u>Pedosphere</u>	5.2	2023
Gonzalez-Santana, I.; Márquez-Guzmán, J.; Cram-Heydrich, S. & Cruz-Ortega, R.	<i>Conostegia xalapensis</i> (Melastomataceae): an aluminum accumulator plant	2012	10.1111/j.1399-3054.2011.01527.x	18	Fisiologia	Physiologia Plantarum	5.4	2023

Souza, M.; Scalon, M.; Poschenrieder, C.; Tolrà, R.; Venâncio, T.; Teixeira, S. & Costa, F.	Aluminium detoxification in facultative ( <i>Passovia ovata</i> (Pohl ex DC.) Kuijt and <i>Struthanthus polyanthus</i> Mart. - Loranthaceae) and dependent ( <i>Psittacanthus robustus</i> (Mart.) Marloth - Loranthaceae) Al-accumulating mistletoe species from the Brazilian savanna	2018	10.1016/j.phytochem.2018.05.020	7	Bioquímica	Phytochemistry	3.2	2023
Souza, M.; Rosa, A.; Poschenrieder, C.; Tolrà, R. & Costa, F.	Fingerprinting metabolomics in tropical mistletoes: A case study with facultative aluminum-accumulating species	2018	10.1016/j.phytol.2018.04.013	10	Bioquímica	Phytochemistry Letters	1.3	2023
Sghaier, D.; Bankaji, I.; Pedro, S.; Caçador, I. & Sleimi, N.	Photosynthetic Behaviour and Mineral Nutrition of <i>Tamarix gallica</i> Cultivated Under Aluminum and NaCl Combined Stress	2019	10.32604/phyton.2019.06887	17	Fisiologia	Phyton-International Journal of Experimental Botany	1.3	2023
Hajiboland, R. & Poschenrieder, C.	Localization and compartmentation of Al in the leaves and roots of tea plants	2015	10.32604/phyton.2015.84.086	16	Anatomia			
Nogueira, M.; Marin, V.; Habermann, G. & Cardoso, J.	In vitro organogenesis, content phenols, and antioxidant capacity of two aluminum accumulator plant species from the Cerrado region, Brazil	2023	10.1007/s11627-023-10371-3	0	Fisiologia	Plant	3.6	2023
Medeiros, R. & Haridasan, M.	Seasonal variations in the foliar concentrations of nutrients in some aluminum accumulating and non-accumulating species of the cerrado region of central Brazil	1985	10.1007/BF02197499	37	Fisiologia	Plant and Soil	3.9	2023

Domingos, M.; Klumpp, A.; Rinaldi, M.; Modesto, E.; Klumpp, G. & Delitti, W.	Combined effects of air and soil pollution by fluoride emissions on <i>Tibouchina pulchra</i> Cogn., at Cubatão, SE Brazil, and their relations with aluminium	2003	10.1023/A:1022800225753	52	Fisiologia
Izaguirre-Mayoral, M.; Flores, S. & Oropeza, T.	Aluminum tolerance in nodulated N <sub>2</sub> -fixing legumes species native to two contrasting savanna sites	2002	10.1023/A:1020666109189	7	Fisiologia
Watanabe, T.; Osaki, M. & Tadano, T.	Al uptake kinetics in roots of <i>Melastoma malabathricum</i> L. – an Al accumulator plant	2001	10.1023/A:1010365607325	31	Fisiologia
Watanabe, T.; Osaki, M.; Yoshihara, T. & Tadano, T.	Distribution and chemical speciation of aluminum in the Al accumulator plant, <i>Melastoma malabathricum</i> L.	1998	10.1023/A:1004341415878	119	Fisiologia
Cuenca, G.; Herrera, R. & Medina, E.	Aluminium tolerance in trees of a tropical cloud forest	1990	10.1007/BF00010654	61	Bioquímica
Haridasan, M.; Hill, P. & Russell, D.	Semiquantitative estimates of Al and other cations in the leaf tissues of some Al-accumulating species using electron probe microanalysis	1987	10.1007/BF02370631	14	Anatomia
Watanabe, T. & Osaki, M.	Influence of aluminum and phosphorus on growth and xylem sap composition in <i>Melastoma malabathricum</i> L.	2001	10.1023/A:1013395814958	59	Fisiologia
Mazorra, M.; San, J.; Montes, R.; Miragaya, J. & Haridasan, M.	Aluminium concentration in the biomass of native species of the Morichals (swamp palm community) at the Orinoco Llanos, Venezuela	1987	10.1007/BF02370716	24	Fisiologia

Zhao, H.; Huang, W.; Zhang, Y.; Zhang, Z.; Li, Y.; Tang, C.; Huang, J. & Ni, D.	Natural variation of CsSTOP1 in tea plant ( <i>Camellia sinensis</i> ) related to aluminum tolerance	2018	10.1007/s11104-018-3746-y	13	Genética
Osawa, H.; Ikeda, S. & Tange, T.	The rapid accumulation of aluminum is ubiquitous in both the evergreen and deciduous leaves of Theaceae and Ternstroemiaceae plants over a wide pH range in acidic soils	2012	10.1007/s11104-012-1285-5	13	Fisiologia
Osaki, M.; Watanabe, T.; Ishizawa, T.; Nilnond, C.; Nuyim, T.; Sittibush, C. & Tadano, T.	Nutritional characteristics in leaves of native plants grown in acid sulfate, peat, sandy podzolic, and saline soils distributed in Peninsular Thailand	1998	10.1023/A:1004389331808	43	Fisiologia
Masunaga, T.; Kubota, D.; Hotta, M. & Wakatsuki, T.	Mineral Composition of Leaves and Bark in Aluminum Accumulators in a Tropical Rain Forest in Indonesia	1998	10.1080/00380768.1998.10414456	40	Fisiologia
Liu, W.; Zheng, H.; Liu, C.; Guo, M.; Zhu, S.; Cao, Y.; Qiu, R.; Morel, J.; Ent, A. & Tang, Y.	Variation in rare earth element (REE), aluminium (Al) and silicon (Si) accumulation among populations of the hyperaccumulator <i>Dicranopteris linearis</i> in southern China	2021	10.1007/s11104-021-04835-x	18	Fisiologia
Nogueira, M.; Bressan, A.; Pinheiro, M. & Habermann, G.	Aluminum-accumulating Vochysiaceae species growing on a calcareous soil in Brazil	2019	10.1007/s11104-019-03978-2	11	Anatomia

Souza, M.; Habermann, G.; Amaral, C.; Rosa, A.; Pinheiro, M. & Costa, F.	<i>Vochysia tucanorum</i> Mart.: an aluminum-accumulating species evidencing calcifuge behavior	2017	10.1007/s11104-017-3355-1	19	Fisiologia			
Bressan, A.; Coan, A.; Habermann, G.	X-ray spectra in SEM and staining with chrome azurol S show Al deposits in leaf tissues of Al-accumulating and non-accumulating plants from the cerrado	2016	10.1007/s11104-016-2841-1	23	Anatomia			
Haridasan, M.; Paviani, T. & Schiavini, I.	Localization of aluminium in the leaves of some aluminium-accumulating species	1986	10.1007/BF02374336	42	Anatomia			
Souza, M.; Williams, T.; Poschenrieder, C.; Jansen, S.; Pinheiro, M.; Soares, I. & Franco, A.	Calcicole behaviour of <i>Callisthene fasciculata</i> Mart., an Al- accumulating species from the Brazilian Cerrado	2019	10.1111/plb.13036	8	Fisiologia			
Silva, G.; Rodrigues, J.; Carvalho, B.; Gavassi, M.; Bressan, A. & Habermann, G.	Absence of aluminium compromises root integrity, leaf hydration and Rubisco performance in <i>Qualea</i> <i>grandiflora</i> , reduces an Al- accumulating species	2023	10.1111/plb.13535	1	Bioquímica	Plant biology	4.2	20223
Jansen, S.; Watanabe, T.; Caris, P.; Geuten, K.; Lens, F.; Pyck, N. & Smets, E.;	The Distribution and Phylogeny of Aluminium Accumulating Plants in the Ericales	2004	10.1055/s-2004-820980	20	Taxonomia e Sistemática			
Scalon, M.; Haridasan, M. & Franco, A.	A comparative study of aluminium and nutrient concentrations in mistletoes on aluminium- accumulating and non- accumulating hosts	2013	10.1111/j.1438-8677.2012.00713.x	21	Anatomia			

Fan, K.; Wang, M.; Gao, Y.; Ning, Q. & Shi, Y.	Transcriptomic and ionic analysis provides new insight into the beneficial effect of Al on tea roots' growth and nutrient uptake	2019	10.1007/s00299-019-02401-5	15	Genética	Plant Cell Reports	5.3	2023
Osaki, M.; Watanabe, T.; Ishizawa, T.; Nilnond, C.; Nuyim, T.; Shinano, T.; Urayama, M. & Tuah, S.	Nutritional characteristics of the leaves of native plants growing in adverse soils of humid tropical lowlands	2003	10.1023/A:1024415203690	17	Fisiologia	Plant Foods for Human Nutrition	3.1	2023
Ma, J.; Hiradate, S.; Nomoto, K.; Iwashita, T. & Matsumoto, H.	Internal Detoxification Mechanism of Al in <i>Hydrangea</i> ' Identification of Al Form in the Leaves	1997	10.1104/pp.113.4.1033	257	Fisiologia	Plant Physiology	6.6	2023
Arriola, I.; Figueiredo, M.; Boanares, D.; França, M. & Isaias, R.	Apoplast-symplast compartmentalization and functional traits of iron and aluminum in promeristematic tissues of nematode induced galls on <i>Miconia</i> spp.	2020	10.1016/j.plaphy.2020.06.031	4	Anatomia			
Xu, Q.; Wang, Y.; Ding, Z.; Song, L.; Li, Y.; Ma, D.; Wang, Y.; Shen, J.; Jia, S.; Sun, H. & Zhang, H.	Aluminum induced metabolic responses in two tea cultivars	2016	10.1016/j.plaphy.2016.02.001	33	Bioquímica	Plant Physiology and Biochemistry	6.1	2023
Qu, X.; Zhou, J.; Masabni, J. & Yuan, J.	Phosphorus relieves aluminum toxicity in oil tea seedlings by regulating the metabolic profiling in the roots	2020	10.1016/j.plaphy.2020.04.030	24	Bioquímica			
Zhang, X.; Gao, H.; Wu, H.; Yang, T.; Zhang, Z.; Mao, J. & Wan, X.	Ca <sup>2+</sup> and CaM are involved in Al <sup>3+</sup> pretreatment-promoted fluoride accumulation in tea plants ( <i>Camellia sinesis</i> L.)	2015	10.1016/j.plaphy.2015.08.007	29	Bioquímica			

Watanabe, T.; Misawa, S.; Hiradate, S. & Osaki, M..	Root mucilage enhances aluminum accumulation in <i>Melastoma malabathricum</i> , an aluminum accumulator	2008	10.4161/psb.3.8.6356	42	Bioquímica	Plant Signaling and Behavior	2.8	2023
Watanabe, T.; Jansen, S. & Osaki, M.	Al-Fe interactions and growth enhancement in <i>Melastoma malabathricum</i> and <i>Miscanthus sinensis</i> dominating acid sulphate soils	2006	10.1111/j.1365-3040.2006.01586.x	55	Fisiologia	Plant, Cell & Environment	6.1	2023
Cuenca, G.; Herrera, R. & Mérida, T.	Distribution of aluminium in accumulator plants by X-ray microanalysis in <i>Richeria grandis</i> Vahl leaves from a cloud forest in Venezuela	1991	10.1111/j.1365-3040.1991.tb00954.x	30	Anatomia			
Yamashita, H.; Fukuda, Y.; Yonezawa, S.; Morita, A. & Ikka, T.	Tissue ionome response to rhizosphere pH and aluminum in tea plants ( <i>Camellia sinensis</i> L.), a species adapted to acidic soils	2020	10.1002/pei3.10028	10	Fisiologia	Plant-Environment Interactions	-	-
Hajiboland, R.; Moradi, A.; Kahneh, E.; Poschenrieder, C.; Nazari, F.; Pavlovic, J.; Tolra, R.; Salehi-Lisar, S. & Nikolic, M.	Weed Species from Tea Gardens as a Source of Novel Aluminum Hyperaccumulators	2023	10.3390/plants12112129	1	Fisiologia	Plants	4.0	2023
Wang, Y.; Cheng, J.; Wei, S.; Jiang, W.; Li, Y.; Guo, W.; Dai, W. & Liao, B.	Metabolomic Study of Flavonoids in <i>Camellia drupifera</i> under Aluminum Stress by UPLC-MS/MS	2023	10.3390/plants12071432	2	Bioquímica			

Negishi, T.; Oshima, K.; Hattori, M.; Kanai, M.; Mano, S.; Nishimura, M. & Yoshida, K.	Tonoplast- and Plasma Membrane-Localized Aquaporin-Family Transporters in Blue <i>Hydrangea</i> Sepals of Aluminum Hyperaccumulating Plant	2012	10.1371/journal.pone.0043189	96	Genética			2023
Schmitt, M.; Boras, S.; Tjoa, A.; Watanabe, T. & Jansen, S.	Aluminium Accumulation and Intra-Tree Distribution Patterns in Three Arbor aluminosa (Symplocos) Species from Central Sulawesi	2016	10.1371/journal.pone.0149078	23	Fisiologia	Plos One	2.9	
Chen, H.; Lu, C. & Jiang, H.	Global Transcriptome Analysis Reveals Distinct Aluminum-Tolerance Pathways in the Al-Accumulating Species <i>Hydrangea macrophylla</i> and Marker Identification	2015	10.1371/journal.pone.0144927	34	Genetica			
Souza, M.; Amaral, C.; Habermann, G.; Alves, P. & Costa, F.	Non-destructive model to estimate the leaf area of multiple Vochysiaceae species	2015	10.1007/s40415-015-0176-4	5	Morfologia	<u>Brazilian Journal of Botany</u>	1.4	2023
García, T. & Fonseca, R.	Aquatic Macrophytes as Bioindicators of Metals in Water Reservoirs In Venezuela	2022	10.20937/RICA.54119	0	Fisiologia	Revista Internacional de Contaminación Ambiental	0.4	2023
Serrano, H.; Pinto, M.; Martins-Loução, M. & Branquinho, C.	How does an Al-hyperaccumulator plant respond to a natural field gradient of soil phytoavailable Al?	2011	10.1016/j.scitotenv.2011.06.036	16	Fisiologia	Science of the Total Environment	8.2	2023
Huang, D.; Gong, Z.; Chen, X.; Wang, H.; Tan, R. & Mao, Y.	Transcriptomic responses to aluminum stress in tea plant leaves	2021	10.1038/s41598-021-85393-1	17	Genetica	Scientific Reports	3.8	2023

Osaki, M.; Watanabe, T. & Tadano, T.	Beneficial effect of aluminum on growth of plants adapted to low pH soils	1997	10.1080/00380768.1997.10414782	152	Fisiologia			
Watanabe, T.; Osaki, M. & Tadano, T.	Aluminum-induced growth stimulation in relation to calcium, magnesium, and silicate nutrition in <i>Melastoma malabathricum</i> L.	1997	10.1080/00380768.1997.10414649	52	Fisiologia	Soil Science and Plant Nutrition	1.9	2023
Masunaga, T.; Kubota, D.; Hotta, M. & Wakatsuki, T.	Nutritional characteristics of mineral elements in tree species of tropical rain forest, West Sumatra, Indonesia	1997	10.1080/00380768.1997.10414764	10	Fisiologia			
Mayoral, M. & Flores, S.	Symbiotic Nitrogen Fixation in <i>Dioclea guianensis</i> Benth., a Shade-Tolerant and Aluminium-Accumulator Legume Species Native of Tropical Cloud Forests	1995	-	7	Fisiologia	Symbiosis	2.1	2023
Khairil, M. & Burslem, D.	Controls on foliar aluminium accumulation among populations of the tropical shrub <i>Melastoma malabathricum</i> L. (Melastomataceae)	2018	10.1093/treephys/tpy082	8	Fisiologia			
Watanabe, T. & Osaki, M.	Role of organic acids in aluminum accumulation and plant growth in <i>Melastoma malabathricum</i>	2002	10.1093/treephys/22.11.785	41	Bioquímica	Tree Physiology	3.5	2023
Zeng, Q.; Chen, R.; Zhao, X.; Shen, R.; Noguchi, A.; Shinmachi, F. & Hasegawa, I.	Aluminum could be transported via phloem in <i>Camellia oleifera</i> Abel	2012	10.1093/treephys/tps117	20	Fisiologia			
Bittencourt, B.; Silva, C.; Filho, S. & Habermann, G.	Aluminum (Al)-induced organic acid exudation in an Al-accumulating species from the Brazilian savanna	2020	10.1007/s00468-019-01907-5	9	Bioquímica	Trees	2.7	2023

Zaia, M.; Timpone, L. & Habermann, G.	Do aluminum (Al)- accumulating species from the Brazilian savanna accumulate Al in the roots?	2022	10.1007/s00468-022-02301-4	2	Fisiologia			
Huang, J.; Xia, H.; Li, Z.; Xiong, Y. & Kong, G.	Soil aluminium uptake and accumulation by <i>Paspalum notatum</i>	2009	10.1177/0734242X09103835	8	Fisiologia	Waste Management & Research	3.7	2023
Doğanlar, Z. & Atmaca, M.	Influence of Airborne Pollution on Cd, Zn, Pb, Cu, and Al Accumulation and Physiological Parameters of Plant Leaves in Antakya (Turkey)	2011	10.1007/s11270-010-0442-9	80	Fisiologia	Water, Air, & Soil Pollution	3.8	

**Tabela S2.** Lista completa de Criptógamas Al-acumuladoras. \*DP = Desvio padrão

Grupo	Família	Espécie	Concentração de Al (g/kg)	País	Média e DP família	Média e DP grupo
<b>Briófitas</b>	Hypnaceae	<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw.	1.3015	Irã	-	2.159833 ± 1.543749
	Brachytheciaceae	<i>Brachythecium rutabulum</i> (Hedw.) Schimp.	1.236	Irã	-	
	Pottiaceae	<i>Barbula unguiculata</i> Hedw.	3.942	Irã	-	
<b>Monilófitas</b>	Pteridaceae	<i>Pityrogramma calomelanos</i> (L.) Link	2.578	Malásia	-	-
	Cyatheaceae	<i>Cyathea gibbosa</i> (Klotzsch) Domin	3.616	Venezuela	-	
	Gleicheniaceae	<i>Dicranopteris flexuosa</i> (Schrad.) Underw.	2.118	Venezuela	755.9706 ± 1683.496	

		<i>Dicranopteris linearis</i> (Burm.f.) Underw.	3767.5	Malásia	1086.664071
		<i>Dicranopteris linearis</i> (Burm.f.) Underw.	2.941	China	
		<i>Sticherus nudus</i> (Moritz ex Reichardt) Nakai	3.894	Venezuela	
		<i>Dicranopteris pedata</i> (Houtt.) Nakaike	3.4	China	
	Polypodiaceae	<i>Elaphoglossum sporadolepis</i> (Kuntze)	1.507	Venezuela	1.5695 ± 0.0838835
		<i>Nephrolepis cordifolia</i> (L.) C.Presl	1.632	Venezuela	
	Equisetaceae	<i>Equisetum telmateia</i> Ehrh.	1.6485	Irā	-
<b>Licopodiófitas</b>	Lycopodiaceae	<i>Lycopodium clavatum</i> L.	9,049	Brasil	5.8870 ± 4.471743
		<i>Lycopodium clavatum</i> L.	2.725	Venezuela	

**Tabela S3.** Lista completa de Angiospermas Al-acumuladoras. As famílias cujos dados de Al-acumulação foram compilados pela primeira vez são marcadas com asterisco (\*). DP = Desvio Padrão

Família	Espécie	Concentração de Al (g/kg)	País	Média e DP família
	<i>Alternanthera sessilis</i> (L.) DC.	2,91	Índia	
	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	1,43 ± 0,23	Irã	
<b>Amaranthaceae*</b>	<i>Amaranthus blitoides</i> S. Watson	2,22 ± 0,51	Irã	1.975375 ± 0.6366954
	<i>Amaranthus blitum</i> L.	2,28 ± 0.47	Irã	
	<i>Arthrocnemum indicum</i> (Willd.) Moq.	1,03	Tunísia	
<b>Anacardiaceae*</b>	<i>Melanochyla</i> sp. 2	1.25	Indonésia	-

<b>Anisophylleaceae</b>	<i>Anisophyllea quangensis</i> Engl.	7,88	Angola	-
<b>Apiaceae*</b>	<i>Torilis japonica</i> (Huott.) DC.	1,24 ± 0.16	Irã	-
<b>Apocynaceae</b>	<i>Landolphia lanceolata</i> (K.Schum.) Pichon	6,80	Angola	14.10033333 ± 7.29133333
	<i>Nerium oleander</i> L.	21.39 ± 6.77	Turquia	
<b>Aquifoliaceae</b>	<i>Ilex</i> sp.	1.02	Indonésia	-
<b>Araceae*</b>	<i>Pistia stratiotes</i> L.	1,2	República Tcheca	-
<b>Areaceae</b>	<i>Mauritia flexuosa</i> L.f.	1,795	Venezuela	-
<b>Asteraceae*</b>	<i>Eremanthus erythropappus</i> (DC.)	1,149	Brasil	

	<i>Artemisia vulgaris</i> L.	2,151	EUA	1.628167 ± 0.5315066
	<i>Senecio vernalis</i> Waldst. & Kit.	1,18 ± 0.02	Irā	
	<i>Sigesbeckia orientalis</i> L.	1,34 ± 0.25	Irā	
	<i>Erigeron canadensis</i> L.	1,5255	Irā	
	<i>Willemetia tuberosa</i> Fisch. & C. A. Mey.	2,416	Irā	
<b>Brassicaceae*</b>	<i>Microthlaspi umbellatum</i> F. K. Mey.	1,1765	Irā	1.726 ± 0.5495
	<i>Cardamine hirsuta</i> L.	2,2755	Irā	
<b>Campanulaceae*</b>	<i>Campanula rapunculus</i> L.	1,352	Irā	-

<b>Convolvulaceae</b>	<i>Calystegia sepium</i> (L.) R. Br.	1,1295	Irã	-
	<i>Carex Divulsa</i> <i>Stokes</i>	1,1525	Irã	
<b>Cyperaceae</b>	<i>Cyperus haspan</i> L.	1	Tailândia	1.344125 ± 0.2573870
	<i>Rhynchospora tenuis</i> Link	1,25	Tailândia e Malásia	
<b>Dipterocarpaceae*</b>	<i>Hopea</i> sp.	13,11	Indonésia	-
	<i>Diospyros sumatrana</i> Miq.	1,07	Indonésia	8.17 ± 7.10
<b>Ebenaceae</b>	<i>Diospyros</i> sp.	15,27	Indonésia	
<b>Escalloniaceae</b>	<i>Polyosma celebica</i> Schulze-Menz	10,046	Indonésia	-

	<i>Aleurites montana</i> (Lour.) Wilson.	8,86	China	
	<i>Aporusa frutescens</i>	16,82	Indonésia	
	<i>Aporusa maingayi</i>	19,95	Indonésia	
<b>Euphorbiaceae</b>	<i>Aporusa</i> sp. 2	1,00	Indonésia	12.257143 ± 8.4590912
	<i>Claoxylon</i> sp. I	1,26	Indonésia	
	<i>Aporusa nigricans</i>	18,50	Indonésia	
	<i>Aporusa</i> sp. I	19,41	Indonésia	
	<i>Trifolium repens</i> L.	4,003	Irã	
<b>Fabaceae*</b>	<i>Prosopis laevigata</i>	3,55	México	
	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	19,112	Turquia	

---

<i>Dioclea Guianensis Benth.</i>	1,3	Venezuela	
<i>Chamaecrista tetraphylla</i>	2,7	Venezuela	
<i>Zornia curvata Mohlenbr.</i>	3,3	Venezuela	
<i>Clitoria guianensis (Aubl.) Benth.</i>	3,45	Venezuela	
<i>Chamaecrista flexuosa (L.) Greene</i>	3,5	Venezuela	
<i>Galactia jussiaeana Kunth</i>	11,2	Venezuela	83.335413 ± 375.2357272
<i>Rhynchosia mineira</i>	15,2	Venezuela	
<i>Centrosema pubescens Benth.</i>	1,3	Venezuela	

---

---

<i>Phaseolus gracilis</i> Poepp.	2,1	Venezuela
<i>Phaseolus gracilis</i> Poepp.	3,7675	Brasil
<i>Chamaecrista rotundifolia</i> (Pers.) Greene	5,057	Brasil
<i>Stylosanthes guianensis</i> (Aubl.) Sw.	1,310	Brasil
<i>Zornia</i> sp.	1,646	Brasil
<i>Chamaecrista viscosa</i> (Kunth)	1804,5	Brasil
<i>Galactia</i> sp.	1,904	Brasil
<i>Chamaecrista chapadae</i> (H.S.Irwin & Barneby)	2,111	Brasil

---

	<i>Crotalaria sp.</i>	2,851	Brasil	
	<i>Chamaecrista venulosa</i> (Benth.)	1,913	Brasil	
	<i>Chamaecrista repens</i> (Vogel)	16,390	Brasil	
	<i>Castanopsis rhamnifolia</i> (Miq.)	1,81	Indonésia	
<b>Fagaceae*</b>	<i>Lithocarpus gracilis</i> (Korth.)	3,5	Indonésia	2.293333 ± 1.0518713
	<i>Lithocarpus ewyckii</i> (Korth.)	1,57	Indonésia	
<b>Geraniaceae*</b>	<i>Geranium pyrenaicum</i> Burm. f.	1,053	Irã	1.58275 ± 0.52975
	<i>Geranium dissectum</i> L.	2,1125	Irã	

<b>Hydrangeaceae</b>	<i>Hydrangea macrophylla</i> (Thunb.) Ser.	5	China e Japão	6.706000 ± 4.7924219
<b>Ixonanthaceae*</b>	<i>Ixonanthes sp.</i>	1,08	Indonésia	-
	<i>Mentha pulegium</i> L.	1,2725	Irã	
<b>Lamiaceae*</b>	<i>Prunella vulgaris</i>	1,4025	Irã	2.319000 ± 1.1456409
	<i>Lamium album</i> L.	3,106	Irã	
	<i>Mentha aquatica</i> L.	3,495	Irã	
	<i>Litsea sp.</i>	3,25	Indonésia	
<b>Lauraceae</b>	<i>Cryptocarya scortechinii</i> Gamble	1,06	Indonésia	5.431429 ± 6.4333750
	<i>Cinnamomum verum</i> J.Presl	1,09	Indonésia	

	<i>Litsea ferruginea</i> (Blume)	3,56	Indonésia	
	<i>Litsea lanceolata</i> (Blume)	3,79	Indonésia	
	<i>Litsea meyeri</i> Kosterm.	5,72	Indonésia	
	<i>Laurus nobilis</i> L.	19,55	Turquia	
	<i>Struthanthus polyanthus</i> Mart.	5,83	Brasil	
	<i>Psittacanthus robustus</i> (Mart.)	9,3395	Brasil	9.298286 ± 2.6976342
<b>Loranthaceae*</b>	<i>Phthirusa ovata</i> Eichl.	10,869	Brasil	
	<i>Passovia ovata</i> (Pohl ex DC.)	11,94	Brasil	
<b>Malpighiaceae*</b>	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	1,2	Venezuela	-

	<i>Sterculia sp.</i>	1,01	Indonésia	
<b>Malvaceae*</b>	<i>Pterocymbium sp.</i>	1,28	Indonésia	1.399000 ± 0.3893122
	<i>Sterculia sp. 1</i>	1,37	Indonésia	
	<i>Malva neglecta</i> Wallr.	1,936	Irã	
<b>Melastomataceae</b>	<i>Melastoma malabathricum</i> L.	7,13	Japão Malásia Tailândia	
	<i>Tristemma mauritianum</i> J.F.Gmel.	4,674	Angola	
	<i>Tibouchina heteromalla</i> (DC.)	2	Brasil	
	<i>Miconia rubiginosa</i> (Bonpl.) DC.	3,2555	Brasil	

---

<i>Miconia albicans</i> (Sw.) Steud.	6,256375	Brasil
<i>Tibouchina pulchra</i> (Cham.)	7,3268	Brasil
<i>Miconia albicans</i>	7,628	Brasil
<i>Miconia albicans</i> (Sw.)	5,81	Brasil
<i>Miconia Corallina Spring</i>	1,871	Brasil
<i>Trembleya parviflora</i> (D.Don) Cogn.	3878	Brasil
<i>Lavoisiera pectinata</i> (Thunb.) DC.	8,589	Brasil
<i>Miconia lacunosa</i> (Cogn.)	8,994	Brasil

---

---

<i>Miconia ibaguensis</i> (Bonpl.)	12,017	Brasil	
<i>Graffenrieda emarginata</i> (Ruiz & Pav.)	3,4	Equador	
<i>Miconia sp.</i>	1,64	Equador	66.825897 ± 303.4423575
<i>Memecylon laurinum</i>	12,71	Indonésia	
<i>Ptemandra caerulescens</i>	16,64	Indonésia	
<i>Conostegia xalapensis</i> (Bonpl.)	15,2395	México	
<i>Melastoma sp.</i>	3,990333333	Tailândia e Malásia	
<i>Miconia dodecandra</i> Cogn.	1,973	Venezuela	

---

---

<i>Bellucia grossularioides</i> (L.) Triana	3	Venezuela
<i>Miconia Alata</i> (Aubl.) DC.	4,23	Venezuela
<i>Henriettea succosa</i> (Aubl.) DC.	4,67	Venezuela
<i>Clidemia novemneria</i> (DC.) Triana	4,73	Venezuela
<i>Graffenrieda latifolia</i> (Naudin) Triana	4,78	Venezuela
<i>Rynchanthera grandiflora</i> (Aubl.) DC.	4,91	Venezuela
<i>Miconia tomentosa</i> (Rich.)	5,3	Venezuela
<i>Meriania urceolata</i> Triana	5,83	Venezuela

---

---

<i>Miconia rufescens</i> (Aubl.) DC.	6,03	Venezuela
<i>Miconia Lepidota</i> DC.	6,745	Venezuela
<i>Miconia stephananthera</i> Ule	6,899	Venezuela
<i>Miconia macrothyrsa</i> Benth.	7,07	Venezuela
<i>Tococa guianensis</i> Aubl.	7,29	Venezuela
<i>Pterogastra divaricata</i> (Bompl.)	7,415	Venezuela
<i>Miconia ciliata</i> (Rich.) DC.	8,03	Venezuela
<i>Henriettella ovata</i> Cogn. in Mart.	9,3	Venezuela

---

	<i>Miconia fallax</i> DC.	11,81	Venezuela	
	<i>Pterolepis glomerata</i> (Rottb.) Miq.	13	Venezuela	
	<i>Pterolepis trichotoma</i> (Rottb.) Cogn.	13,89	Venezuela	
	<i>Desmoscelis villosa</i> (Aubl.) Naudin	35,23	Venezuela	
<b>Meliaceae*</b>	<i>Chisocheton macranthus</i> (Merr.)	1,36	Indonésia	
	<i>Dysoxylum</i> sp. I	1,07	Indonésia	6.806000 ± 9.6849816
<b>Meliaceae*</b>	<i>Melia azedarach</i> L.	17,988	Turquia	
<b>Moraceae*</b>	<i>Ficus</i> sp.	1,04	Indonésia	

	<i>Ficus schwarzii</i> Koord.	2,09	Indonésia	1.565 ± 0.742
<b>Myristicaceae*</b>	<i>Knema cinerea</i> (Poir.) Warb	1,55	Indonésia	-
	<i>Eugenia malangensis</i> (O.Hoffm.)	13,989	Angola	
	<i>Eugenia bisulea</i>	22,75	Indonésia	
<b>Myrtaceae</b>	<i>Eugenia decipiens</i> Koord. & Valetton	3,44	Indonésia	10.300200 ± 8.2688782
	<i>Eugenia paucipunctata</i>	3,38	Indonésia	
	<i>Eugenia spicata</i> Lam.	2,942	Tailândia e Malásia	
<b>Nyssaceae</b>	<i>Mastixia trichotoma</i>	6,14	Indonésia	-
<b>Opiliaceae*</b>	<i>Champereia manillana</i> (Blume)	1,04	Indonésia	-

<b>Oxalidaceae*</b>	<i>Oxalis acetosella</i> L.	1,687	Irã	-
	<i>Eurya acuminata</i>	19,63	Indonésia	
<b>Pentaphylacaceae</b>	<i>Cleyera japonica</i> Thunb.	7,5	Japão	15.710000 ± 7.1124750
	<i>Eurya japonica</i> Thunb.	20	Japão	
<b>Phyllanthaceae</b>	<i>Richeria grandis</i> Vahl	8,2625	Venezuela	8,2625 ± 9,528263876
<b>Phytolaccaceae</b>	<i>Phytolacca americana</i> L.	1,4655	China e Irã	903 ± 1274,823724
<b>Plantaginaceae*</b>	<i>Veronica persica</i> Poir.	1,619	Irã	
	<i>Plantago almogravensis</i>	1	Portugal	800.873000 ± 1384.8846405

	<i>Plantago almogravensis</i> Franco	2400	Portugal	
<b>Platanaceae*</b>	<i>Platanus orientalis</i> L.	25,69166667	Turquia	-
	<i>Setaria viridis</i> (L.) P. Beauv.	1,429	Irã	
	<i>Poa annua</i> L.	2,6575	Irã	1067.816125 ± 2132.1226813
<b>Poaceae</b>	<i>Hypogynium virgatum</i> (Desv.)	1,178	Venezuela	
	<i>Andropogon selloanus</i> (Hack.)	4266	Venezuela	
<b>Polygalaceae</b>	<i>Xanthophyllum rufum</i> A.W.Benn.	12,94	Indonésia	-
<b>Polygonaceae*</b>	<i>Rumex conglomeratus</i> Murray	1,4165	Irã	

	<i>Polygonum aviculare</i> L.	2,6025	Irã	2.346000 ± 0.8314720
	<i>Polygonum hydropiper</i> L.	3,019	Irã	
<b>Pontederiaceae*</b>	<i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.)	5	Venezuela	-
<b>Primulaceae*</b>	<i>Primula heterochroma</i> Stapf	1,4155	Irã	-
<b>Proteaceae</b>	<i>Heliciopsis artocarpoides</i> (Elmer)	8,45	Indonésia	-
<b>Rhizophoraceae*</b>	<i>Bruguiera sexangula</i> (L.)	1,2	China	-
<b>Rosaceae*</b>	<i>Pyracantha coccinea</i> M.Roem.	4,2475	Turquia	-
<b>Rubiaceae</b>	<i>Gouldia terminalis</i> (Hook. & Arn.)	1,946	EUA	

---

<i>Emmeorrhiza umbellata</i> (Spreng.)	1,837	Bélgica	
<i>Canthium confertum</i> Korth.	1,885	Borneo	
<i>Saprosma arboreum</i> Blume	9,854	Borneo	
<i>Faramea marginata</i>	18,14533333	Brasil	
<i>Coccocypselum canescens</i> Willd.	10,357	Brasil	15.350583 ± 13.8646598
<i>Coptosapelta olaciformis</i> (Merr.)	10,535	Filipinas	
<i>Anthocephalus chinensis</i> (Lam.)	1,16	Indonésia	
<i>Spathostemon javensis</i>	16,29	Indonésia	

---

	<i>Urophyllum macrophyllum</i> (Blume)	22,155	Indonésia	
	<i>Maschalocorymbus corymbosus</i> (Blume)	40,71	Indonésia	
	<i>Craterispermum laurinum</i> (Poir.)	36,202	Libéria	
	<i>Alberta minor</i> Baill.	2,472	Madagascar	
	<i>Danais fragrans</i> (Lam.)	9,146	Madagascar	
	<i>Nephelium dasyneurum</i> Radlk	1,29	Indonésia	
<b>Sapindaceae*</b>	<i>Pometia Alnifolia</i> (Blume)	1,16	Indonésia	10.732667 ± 16.4678900
	<i>Acer negundo</i> L.	29,748	Turquia	

	<i>Palaquium obovatum</i>	1,11	Indonésia	1.12 ± 0.0141
<b>Sapotaceae*</b>	<i>Ganua motleyana</i> (de Vriese)	1,13	Indonésia	
<b>Solanaceae*</b>	<i>Solanum nigrum L.</i>	1,1755	Irã	-
<b>Styracaceae*</b>	<i>Styrax camporum</i> Pohl	2,545	Brasil	-
	<i>Symplocos ambangensis</i> Noot.	16,719	Indonésia	
<b>Symplocaceae</b>	<i>Symplocos ophirensis</i> C.B.Clarke	21,352	Indonésia	1042.113500 ± 2043.2595699
	<i>Symplocos odoratissima</i> (Blume)	23,383	Indonésia	
	<i>Symplocos paniculata</i> (Thunb.)	4107	Reino Unido e EUA	

<b>Tamaricaceae*</b>	<i>Tamarix gallica L.</i>	3,28	Tunísia	-
	<i>Camellia sinensis (L.) Kuntze</i>	8,133333333	China e Índia	
	<i>Camellia oleifera C.Abel</i>	12,04	China	
	<i>Camellia japonica L.</i>	13,328	China	
<b>Theaceae</b>	<i>Shima wallichii (DC.) Korth.</i>	3,77	Indonésia	78.715627 ± 283.0617745
	<i>Gordonia oblongifolia (Miq.)</i>	5,38	Indonésia	
	<i>Gordonia excelsa (Blume)</i>	11,28	Indonésia	
	<i>Stewartia pseudocamellia Maxim.</i>	10	Japão	

	<i>Stewartia monadelpha</i> Siebold & Zucc.	15	Japão	
<b>Ulmaceae*</b>	<i>Trema angustifolia</i>	3,44	Indonésia	-
	<i>Villebrunea rubescens</i> (Blume)	1,08	Indonésia	
<b>Urticaceae*</b>	<i>Dendrocnide stimulans</i> (L.f.)	1,03	Indonésia	1.220333 ± 0.2874549
	<i>Urtica dioica</i> L.	1,551	Irã	
	<i>Vochysia tucanorum</i> Mart.	12500,75	Brasil	
<b>Vochysiaceae</b>	<i>Callistene fasciculata</i> Mart.	2	Brasil	
	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	4,45	Brasil	

---

<i>Vochysia pyramidalis</i> Mart.	6,55	Brasil	8.944213 ± 7.9966686
<i>Callisthene</i> <i>major</i> Mart.	7,65	Brasil	
<i>Qualea</i> <i>parviflora</i> Mart.	12,68815	Brasil	
<i>Vochysia guatemalensis</i> Donn.Sm.	25,0615	Costa Rica	

---

Este capítulo está formatado nas normas da revista *Plant and Soil*, disponível em:

<https://link.springer.com/journal/11104/submission-guidelines?IFA>

**CAPÍTULO II**  
**NOVOS REGISTROS DE MELASTOMATACEAE**  
**ACUMULADORAS DE ALUMÍNIO NA AMAZÔNIA**

## Novos Registros de Melastomataceae Acumuladoras de Alumínio na Amazônia

Maria Danyelle Vieira Leal<sup>1,3</sup> . Laísa Maria de Resende Castro<sup>2</sup> . Rairys Cravo Herrera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Pará-UFPA, Altamira, Pará, Programa de Pós-graduação em Biodiversidade e Conservação-PPGBC, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará-IFPA, Altamira, Pará, Brasil

<sup>3</sup> Autor para Correspondência; e-mail: mariadanyelle1573@gmail.com

### Resumo

**Objetivo** Este estudo investigou a acumulação de alumínio (Al) em espécies nativas de Melastomataceae da Amazônia brasileira. O trabalho envolveu as espécies *Bellucia grossularioides* (L.) Triana, *Miconia affinis* DC., *Miconia chrysophylla* (Rich.) Urb. e *Miconia nervosa* (Sm.) Triana, coletadas em Altamira, Pará, com o objetivo de determinar a concentração de Al e identificar os locais de acumulação do metal, assim como a presença de compostos fenólicos nos tecidos foliares dessas plantas. **Métodos** Realizou-se análise química do solo e das folhas, além de caracterizações anatômica e histoquímica, utilizando reagentes como Chrome Azurol S, Hematoxilina e Cloreto Férrico. **Resultados** Os solos da área de estudo são ácidos. Todas as quatro espécies apresentaram-se como hiperacumuladoras de Al, com concentrações médias variando de 17.256 mg/kg a 30.660 mg/kg na matéria seca foliar. É a primeira vez que a acumulação de Al é registrada em *M. affinis* e *M. chrysophylla*. A análise histoquímica revelou que o Al foi acumulado na parede celular da epiderme, colênquima e parênquima paliçádico. Além disso, detectaram-se compostos fenólicos nos locais de armazenamento de Al. **Conclusões** Esses resultados ampliam o entendimento dos mecanismos de tolerância e adaptação das Melastomataceae ao Al em solos ácidos da Amazônia brasileira. As descobertas destacam a importância dessas plantas na bioacumulação de Al e fornecem insights sobre suas estratégias de desintoxicação.

**Palavras-chave** Histolocalização. Floresta tropical. ESEC Terra do Meio. Hiperacumulação. Solos amazônicos

### Introdução

A família Melastomataceae Juss. é constituída por 177 gêneros e cerca de 5.750 espécies, com maior diversidade em regiões tropicais do globo, com destaque para o neotrópico (Michelangeli et al., 2020). No Brasil, Melastomataceae representa a quinta maior família de angiospermas (BFG, 2021), com espécies ocorrentes em quase todos os domínios fitogeográficos, sendo comuns na Amazônia, no Cerrado, nas formações de campos rupestres e Mata Atlântica (Goldenberg et al., 2012).

Além da vasta distribuição geográfica, Melastomataceae destaca-se pela segunda maior diversidade de espécies acumuladoras de alumínio (Al), podendo até mesmo atingir um número proporcional ao da família Rubiaceae, que detém o maior número de acumuladores de Al conhecidos (Chenery, 1948; Jansen et al., 2002a; 2002b; 2003).

Por definição, plantas acumuladoras de Al são aquelas que apresentam concentrações foliares de, no mínimo, 1.000 mg/kg de Al na matéria seca foliar (Chenery, 1948; Jansen et al., 2002a). Algumas espécies, no entanto, conseguem acumular mais de 10.000 mg/kg de Al, sendo conhecidas como hiperacumuladoras do metal (Jansen et al., 2002a; Olivares et al., 2010). Esse traço é particularmente importante, pois permite que essas plantas prosperem em solos ácidos, onde a forma tóxica do alumínio,  $Al^{3+}$ , é um dos principais limitantes do crescimento vegetal (Kocjan et al., 2024). Compreender as estratégias de desintoxicação do alumínio nessas plantas tem sido de grande interesse para os estudos fisiológicos (Jansen et al., 2003; Hajiboland et al., 2023a; Nazari et al., 2023), especialmente quando se considera seu potencial para aplicações biotecnológicas, como por exemplo, a produção de organismos geneticamente modificados com o objetivo de aumentar o rendimento das culturas em solos ácidos (Rahman et al., 2024; Chauhan et al., 2021).

Entre as estratégias adotadas por essas plantas para lidar com a toxicidade do Al, destaca-se a inativação do metal por meio de complexação com ácidos orgânicos, como citrato, oxalato e malato (Liu et al., 2020; Hajiboland et al., 2023a). Essa complexação é um pré-requisito para o acúmulo de altas concentrações de Al nos tecidos da planta, uma vez que impede o contato entre o Al livre e os processos bioquímicos essenciais (Malta et al., 2016; Grevenstuk e Romano, 2013). Outra estratégia utilizada por esses organismos para a desintoxicação do Al envolve a associação do metal com os compostos fenólicos, que, assim como os ácidos orgânicos, complexam o Al livre nos tecidos vegetais (Ofei-Manu et al., 2001; Tolrà et al., 2005; Kocjan et al., 2024).

Atrelado a isto, a identificação dos locais de armazenamento do Al nos tecidos das plantas são fundamentais para compreender os mecanismos relacionados à resistência ao metal e sua desintoxicação (Matsumoto, 2000; van der Ent et al., 2020). Acredita-se, por exemplo, que o armazenamento de Al na epiderme contribua para o isolamento do metal de células com atividade fotossintética (Grevenstuk e Romano, 2013).

Essas e outras estratégias têm sido estudadas há anos em representantes de muitas famílias botânicas de áreas tropicais do mundo (Tolrà et al., 2011; Souza et al., 2017; Cury et al., 2020), incluindo as Melastomataceae (Haridasan et al., 1986; Haridasan, 1988; Watanabe et al., 2008; Bressan et al., 2016). Contudo, no Brasil, onde as Melastomataceae se destacam

como a família com o maior número de espécies acumuladoras de Al, os estudos envolvendo essa família estão limitados às regiões Sudeste e Centro-Oeste, em áreas de prevalência do Cerrado e da Mata Atlântica.

No Cerrado, as Melastomataceae Al-acumuladoras são representados por uma variedade de espécies, como *Tibouchina heteromalla* (D.Don) Cogn., *Trembleya parviflora* (D.Don) Cogn., *Lavoisiera pectinata* Cogn., *Miconia albicans* (Sw.) Steud., *Miconia ferruginata* DC., e *Miconia pohliana* Cogn. (*Miconia leucocarpa* DC.) (Haridasan et al., 1986; Campos et al., 2014; Timpone e Habermann, 2022). Já na Mata Atlântica, encontra-se *Tibouchina pulchra* Cogn. (Domingos et al., 2003).

Na Amazônia, Melastomataceae é a quarta família dominante e a terceira mais rica em espécies arbóreas (Forzza et al., 2010; Ter Steege et al., 2016). A fitorregião amazônica abriga a maior floresta úmida do mundo, com uma vasta diversidade de espécies. Esta floresta se estende do Atlântico aos Andes, cobrindo partes de nove países sul-americanos, incluindo o Brasil, que abriga mais de 60% dessa região (Ab'Saber, 2002; Vieira et al., 2008). Os solos amazônicos são ácidos e ricos em metais, especialmente em alumínio trocável (Ferreira et al., 2001; Oliveira et al., 2007; Chagas Junior et al., 2009; Rebêlo et al., 2020; Garzón e Pena-Venegas 2023). Apesar disso, os estudos sobre a adaptação e a presença de plantas acumuladoras de Al na Amazônia é inexistente.

Neste contexto, considerando o escasso conhecimento sobre as espécies acumuladoras de Al na floresta amazônica, especialmente na região brasileira, e reconhecendo a relevância da família Melastomataceae entre os acumuladores de Al, este trabalho teve como objetivo determinar a concentração de Al em quatro espécies de Melastomataceae nativas da Amazônia brasileira, localizar os sítios de acumulação do metal e verificar a presença de compostos fenólicos nos tecidos foliares das plantas.

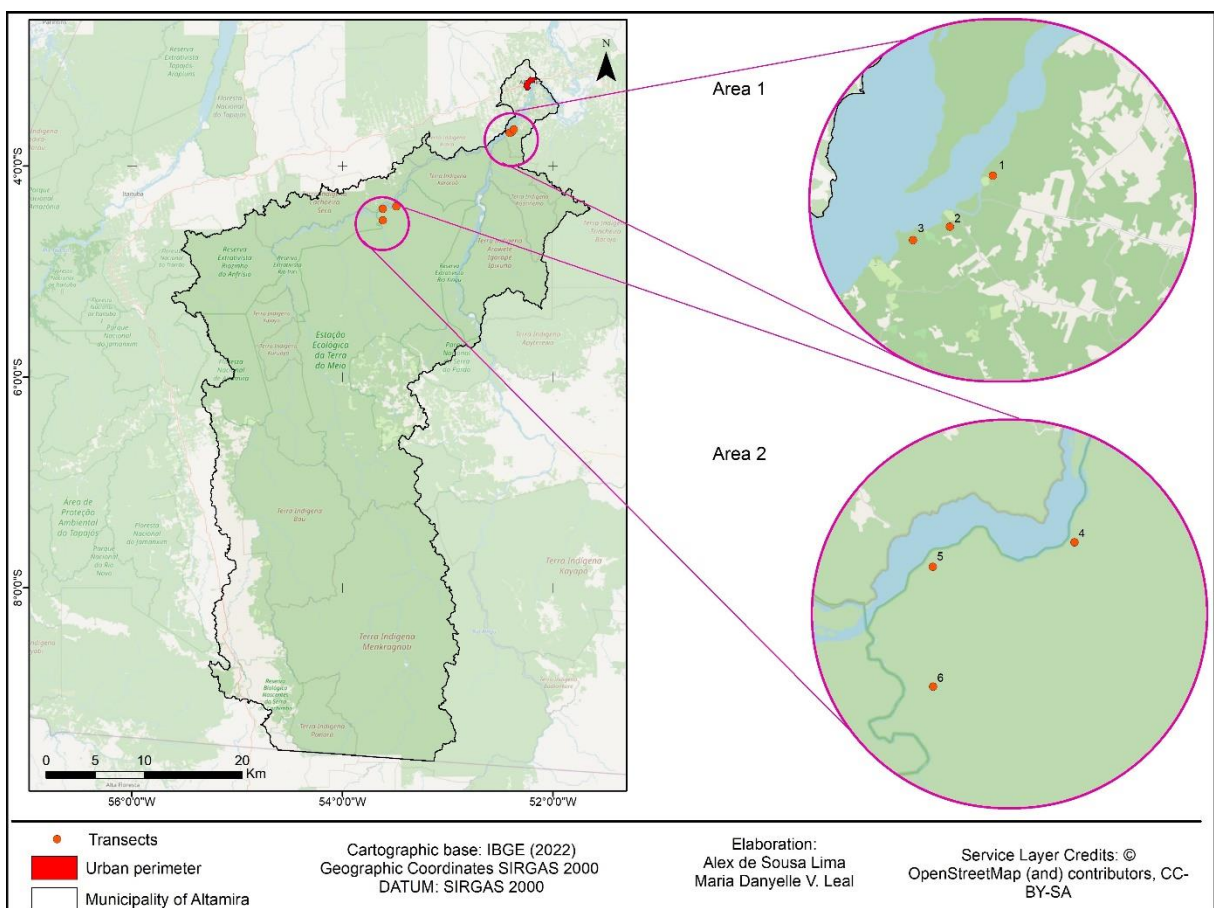
## **Material e métodos**

### **Área de estudo**

A pesquisa foi conduzida no município de Altamira, no sudoeste do Estado do Pará, em duas áreas específicas: “Boca do Iriri” e Estação Ecológica (ESEC) Terra do Meio, identificadas na figura 1 como Área 1 e 2, respectivamente. O município está inserido no bioma Amazônico, caracterizado por uma extensa área territorial coberta por floresta equatorial densa, composta por árvores de grande porte e vegetação emergente (Romão et al., 2017). O clima de Altamira é classificado como equatorial, abrangendo os tipos Am e Aw, com temperaturas médias de 26 °C (Silva et al., 2018). Os solos da região apresentam diversas

classes, como Podzólico Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho-Amarelo (Silva et al., 2020).

A “Boca do Iriri” está localizada na região do Médio Xingu, a montante do reservatório Xingu da Usina Hidrelétrica Belo Monte. Trata-se de uma área onde o rio Iriri deságua no rio Xingu, principal curso hídrico da bacia hidrográfica do Rio Xingu (Skorupa et al., 2017). Essa região compreende cerca de 27 localidades. Já a ESEC Terra do Meio é uma unidade de conservação com 3.373.111 hectares, situada na confluência do Igarapé Mossoró com o rio Iriri e delimitada pela Terra Indígena Kararaô (Brasil, 2005).



**Figura 1.** Município de Altamira – PA - Localização espacial dos transectos na Boca do Iriri (Área 1) e ESEC Terra do Meio (Área 2)

### Coleta do Material Vegetal e Solo

A coleta do material vegetal e do solo foi realizada a partir do estabelecimento de seis transectos de 500 x 5 m, sendo três para cada área de estudo (Figura 1). Os transectos foram estabelecidos em floresta não inundável, ao longo de trilhas estreitas (linha de base), que

seguiram um curso pré-definido por bússola e permaneceram dentro de áreas de vegetação não perturbada, conforme a metodologia de Tuomisto et al. (2002).

Amostras dos tecidos foliares da nervura central de folhas expandidas de *Bellucia grossularioides* (L.) Triana, *Miconia nervosa* (Sm.) Triana, *Miconia chrysophylla* (Rich.) Urb. e *Miconia affinis* DC. foram coletadas em triplicata e fixadas em solução de FAA a 70% (Johansen, 1940) em campo. Posteriormente, em laboratório, o material foi armazenado em etanol a 70% para a etapa de histoquímica. As espécies foram selecionadas com base em sua ocorrência nos transectos e após prospecção em campo, utilizando Chrome Azurol-S a 0,5%, aplicado no pecíolo da planta (Kukachka e Miller, 1980; Carvalho-Júnior, 2012), indicando a presença de alumínio por meio da coloração azul ou roxa. Dados da geolocalização das plantas, assim como o hábito de vida, são fornecidos na Tabela 1.

**Tabela 1.** Hábito e Localização das espécies de Melastomataceae Al-acumuladoras coletadas nas áreas de estudo

<b>Espécie</b>	<b>Hábito</b>	<b>Área de estudo</b>	<b>Coordenadas geográficas</b>
			-03,677649S - 52,393360W
<i>Bellucia grossularioides</i> (L.) Triana	Árvore	Boca do Iriri	-03,677864S - 52,391760W
			-03,652137S - 52,375300W
			-03,684307S - 52,411800W
<i>Miconia nervosa</i> (Sm.) Triana	Árvore	Boca do Iriri	-03,684388S - 52,411700W
			-03,652097S -52,375260
<i>Miconia chrysophylla</i> (Rich.) Urb.	Árvore	ESEC Terra do Meio	-04,404542S - 53,615020W

---

			-04,404555S - 53,615040W
			-04,384241S - 53,482690W
			-04,514477S - 53,616060W
<i>Miconia affinis</i> DC.	Árvore	ESEC Terra do Meio	-04,383478S - 53,484480W
			-04,383492S - 53,484160W

---

Além disso, foi coletado um conjunto de 20 a 30 folhas de cada indivíduo, variando de acordo com o tamanho das folhas de cada espécie, para obter a matéria seca destinada à determinação quantitativa de nutrientes e concentração de alumínio.

Amostras de solo da superfície, provenientes dos 5 cm superiores, foram coletadas no início, no meio e ao final de cada transecto. Cada uma das amostras de solo consistiu em cinco subamostras agrupadas de uma área de cerca de 5x5 m (Tuomisto et al., 2002).

O processo de coleta de material biológico possui nº de autorização 90679-1 e 90430-1, concedidas pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). A identificação taxonômica das espécies foi realizada em campo pelo especialista na família, Dr. Kalle Ruokolainen, e as exsicatas foram depositadas no Herbário Padre José Maria de Albuquerque da Universidade Federal do Pará (UFPA), *Campus* Altamira, sob números de tombo HATM 3552 a 3562.

### **Histoquímica de Alumínio e Compostos Fenólicos**

Foram realizados cortes transversais à mão livre nas amostras foliares coletadas, e antes dos procedimentos histoquímicos para detecção de alumínio e compostos fenólicos (CF), foi realizada a caracterização anatômica das espécies estudadas, utilizando dupla coloração com Azul de Astra a 1,0% e Safranina a 1,0% (Kraus e Arduin, 1997). Para histolocalização de Al, foi usado o Chrome Azurol-S a 0,5% (Kukachka e Mulier, 1980) e solução de Hematoxilina a 0,2% (Andrade et al., 2011). As reações positivas foram identificadas por coloração azulada ou arroxeadada para ambos os reagentes.

Solução aquosa de cloreto férrico a 10% foi usada para detectar a presença de compostos fenólicos (Ventrella et al., 2013). O resultado positivo para os fenóis foi observado por coloração preta ou castanho escuro.

Para cada procedimento histoquímico, foi utilizado um material controle, composto por amostras não coradas, a fim de permitir a comparação e validação das reações observadas.

Lâminas foram montadas em glicerina e impermeabilizadas com esmalte incolor. A documentação fotográfica foi realizada no laboratório de Biotecnologia da UFPA, *Campus Altamira*, com microscópio de luz (BA410FL - MOTIC INSTRUMENTS) equipado com um sistema de captura alternativo de imagem (Smartphone Android, Modelo Redmi Note 9S, 48 megapixels resolução de 8000x6000 pixels).

### **Determinação de alumínio e nutrientes nas plantas e no solo**

Amostras das folhas foram secas em estufa, a 60°C, por aproximadamente 42 horas e, posteriormente, foram trituradas em moinho de facas. Os elementos químicos das folhas foram quantificados a partir da digestão nitro-perclórica e lidos por espectrofotometria de absorção atômica (Agilent MP-AES 4200 Spectrometer) (Tedesco et al., 1995).

Nas amostras de solo, a medição do pH foi realizada pelo método em H<sub>2</sub>O, no qual se prepara uma suspensão solo:água na proporção de 1:2,5, utilizando-se um eletrodo combinado para medir a concentração efetiva de íons H<sup>+</sup>. A determinação do cálcio, magnésio e alumínio trocáveis foi realizada por extração com KCl 1M. O alumínio foi titulado com NaOH, usando azul-de-bromotimol como indicador. O teor de fósforo, potássio, sódio e micronutrientes foi obtido a partir da solução extratora Mehlich 1, composta por HCl 0,05N e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025N. O boro foi extraído com água quente com curcumina ou azometina H como indicador. O enxofre foi extraído como sulfato por meio de fosfato monocálcico monohidratado e medido por cromatografia iônica ou espectrocolorímetro, com base na turbidez formada pela reação com cloreto de bário. Já a acidez potencial do solo (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) foi determinada pela extração com acetato de cálcio ajustado a pH 7,0. A solução foi titulada com hidróxido de sódio padronizado para quantificar os íons hidrogênio e alumínio presente (Embrapa 1997). Todas os nutrientes foram quantificados em espectrofotômetro de absorção atômica (Agilent MP-AES 4200 Spectrometer).

As análises químicas do material vegetal das plantas e do solo foram realizadas pela empresa Soloquímica Análises de Solo Ltda.

## **Análise estatística**

Os dados foram testados quanto ao tipo de distribuição e variância, utilizando os testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Para comparar a concentração de Al trocável e de outros cátions no solo das duas áreas de estudo, foram aplicados o teste t de Student e o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Os dados foram submetidos a uma transformação logarítmica para reduzir assimetrias e disparidades nas distribuições.

A Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada para comparar a capacidade de acúmulo de Al entre as espécies de Melastomataceae estudadas. O teste post hoc de Tukey foi utilizado para identificar as diferenças estatisticamente significativas entre as amostras.

A correlação de Pearson foi utilizada para verificar se existe uma relação significativa entre a concentração de Al retido na matéria seca das plantas e a concentração do metal no solo. O teste foi realizado separadamente para as duas áreas de estudo. Para tanto, os dados de concentração de Al no solo, inicialmente expressos em  $\text{cmolc/dm}^3$ , foram convertidos para  $\text{mg/kg}$ . A conversão foi feita com base no peso molecular e na valência do Al, conforme a seguinte equação:

$$Al (mg/kg) = Al (cmolc/dm^3) \times \frac{26,983}{3} \times 100$$

A Análise de Ordenação Irrestrita de Componentes Principais (PCA) foi usada para os dados da matéria seca das folhas, a fim de entender como o Al e outros elementos químicos interagem de acordo com sua estrutura de covariância e correlação (Silva et al., 2022). Os dados também passaram por transformação logarítmica.

As análises foram realizadas na linguagem de programação R, versão 4.4.1 (R Core Team, 2023), com nível de significância de 0,05.

## **Resultados**

### **Caracterização química do solo e das plantas**

Os solos coletados nas áreas de estudo apresentam pH médio variando entre  $4,57 \pm 0,49$  e  $4,29 \pm 0,36$ , com acidez potencial de  $3,7 \pm 1,1$ , caracterizando-se como ácido. A capacidade de troca de cátions (CTC) e de matéria orgânica (MO) média é de  $6,30 \pm 1,99$   $\text{cmol/dm}^3$  e  $69,51 \pm 20,97$   $\text{g/Kg}$  para Boca do Iriiri, e de  $4,93 \pm 1,24$   $\text{cmol/dm}^3$  e  $40,73 \pm 12,25$   $\text{g/Kg}$  para ESEC Terra do Meio (Tabela 2).

Apesar dessas diferenças, a concentração média de Al trocável, embora variando entre as áreas, não apresenta diferenças estatisticamente significativas conforme apontado pelo teste

t ( $t = -1,9163$ ,  $df = 13,631$ ,  $p = 0,07654$ ). Para Boca do Iriri, os valores médios são de  $0,288 \pm 0,136$   $\text{cmol/dm}^3$ , enquanto na ESEC Terra do Meio são de  $0,58 \pm 0,35$   $\text{cmol/dm}^3$  (Tabela 2). Nesse sentido, a concentração do metal é similar para as áreas de estudo.

O mesmo padrão é observado para a maioria dos cátions disponíveis no solo, sendo que ambas as áreas de estudo apresentam teores médios elevados para ferro (Fe) ( $268.066 \pm 67.379$  e  $240.322 \pm 163.5762$ ) e manganês (Mn) ( $93.622 \pm 77.498$  e  $71.588 \pm 70.872$ ), com menores concentrações de boro (B) ( $0.094 \pm 0.033$  e  $0.080 \pm 2.345$ ) e Ca ( $1.488 \pm 1.823$  e  $0.711 \pm 3.655$ ) (Tabela 2). O K foi o único componente químico analisado que apresentou um comportamento contrário ao das demais variáveis. O teste de comparação revelou uma diferença estatisticamente significativa desse metal alcalino entre as áreas ( $t = 2,1268$ ,  $df = 16$ ,  $p = 0,04934$ ), indicando um teor significativamente maior na Boca do Iriri (cerca de  $0,122$   $\text{cmol/dm}^3$ ) em comparação à ESEC Terra do Meio.

**Tabela 2.** Dados de fertilidade do solo. Informações expressas com base no teor médio das variáveis e desvio padrão

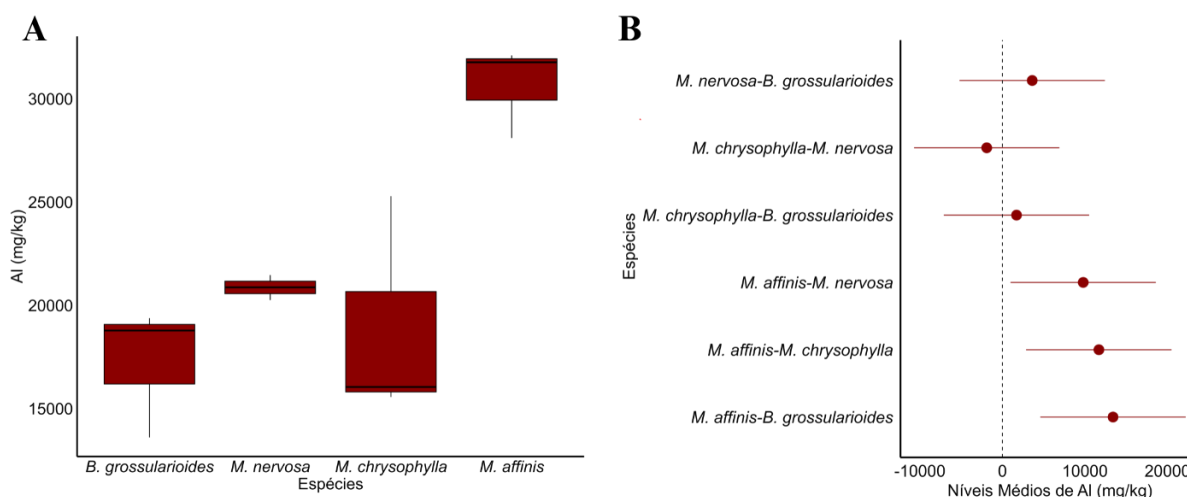
Área	Ca	Mg	K	Na	Al	CTC	P	B	Cu	Fe	Mn	Zn	S	pH	Saturação por Al	MO
	cmol/dm <sup>3</sup>					mg/dm <sup>3</sup>							H <sub>2</sub> O	%	g/kg	
Boca do Irii	1,48± 1,82	0,86± 0,72	0,37± 0,09	0,03± 0,00	0,28± 0,13	6,3± 2,1	5,31±4,44	0,09±0,03	0,66± 0,66	268,06± 67,37	93,62± 77,49	3,54± 2,80	39,23± 11,16	4,5± 0,4	15,0 ± 9,99	69,51 ± 20,97
ESEC Terra do Meio	0,71± 0,36	0,33±0, 23	0,25±0,14	0,03±0,00	0,58±0,35	4,9± 1,3	36,30±92,01	0,08±0,02	0,94±1,00	240,32± 163,57	71,58±0, 70	19,22± 46,84	36,46± 10,85	4,2±0,3	30,78 ± 17,17	40,73 ± 12,25

Nas plantas, por sua vez, o teor médio de Al variou de  $17.256 \pm 3.175$  mg/kg a  $30.660 \pm 2.222$  mg/kg (Tabela 3). Com base nesta concentração, todas as Melastomataceae estudadas são hiperacumuladoras de Al.

**Tabela 3.** Médias e desvios-padrão das concentrações (mg/kg) de nutrientes e alumínio na matéria seca foliar

Espécie	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Al
<i>B. grossularioides</i>	25.666 $\pm 1.154$	1.463 $\pm$ 89.628	15.5 53 $\pm$ 2.50 8	16.93 6 $\pm$ 2.887	5.303 $\pm$ 1.340	1.36 0 $\pm$ 878	33,540 $\pm$ 5,634	12,94 0 $\pm$ 3,353	149,160 $\pm$ 16,218	46,796 $\pm$ 14,026	23,630 $\pm$ 6,542	17.256 $\pm$ 3.175
<i>M. nervosa</i>	16.000 $\pm 7.000$	1.260 $\pm$ 60.827	14.4 30 $\pm$ 3.53 5	24.94 0 $\pm$ 6.926	580 $\pm$ 245	2.38 6 $\pm$ 626	51,18 $\pm$ 225	8,993 $\pm$ 1,636	137,356 $\pm$ 15,173	63,373 $\pm$ 23,070	12,393 $\pm$ 1,432	20.868 $\pm$ 605,48 2
<i>M. chrysophylla</i>	28.333 $\pm$ 577,350	970 $\pm$ 34,641	6.85 3 $\pm$ 2.99 1	17.67 0 $\pm$ 6.163	6.493 $\pm$ 1.538	2.31 6 $\pm$ 2.05 0	2,092 $\pm$ 3,524	10,14 6 $\pm$ 2,582	78,646 $\pm$ 10,010	89,650 $\pm$ 46,807	13,203 $\pm$ 2,465	18.968 $\pm$ 5.479
<i>M. affinis</i>	21.333 $\pm$ 577,350 3	833 $\pm$ 35,118	7.36 0 $\pm$ 978, 110	34.77 0 $\pm$ 4.162	2.570 $\pm$ 225,38 8	3.87 0 $\pm$ 219, 317	65,870 $\pm$ 2,171	7,123 $\pm$ 1,443	94,363 $\pm$ 18,734	120,216 $\pm$ 13,377	18,820 $\pm$ 1,992	30.660 $\pm$ 2.222

A ANOVA revelou que há diferenças significativas no acúmulo de Al entre as quatro espécies estudadas ( $F(3,8) = 9,51$ ,  $p = 0,005$ ), com *M. affinis* apresentando a maior média de concentração do metal ( $30.660,93 \pm 2.222,24$  mg/kg de Al) (Figura 2A). O teste de Tukey revelou que a concentração de Al para *M. affinis* é significativamente maior do que a de *M. chrysophylla* (diff = 11.692,353,  $p = 0,011$ ), *M. nervosa* (diff = 9.792,650,  $p = 0,03$ ) e *B. grossularioides* (diff = 13.404,297,  $p = 0,005$ ) (Figura 2B). O teste post hoc revelou ainda que as concentrações de Al entre *B. grossularioides*, *M. nervosa* e *M. chrysophylla* não apresentam diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) (Figura 2B). Portanto, *M. affinis* se destaca entre as espécies analisadas.



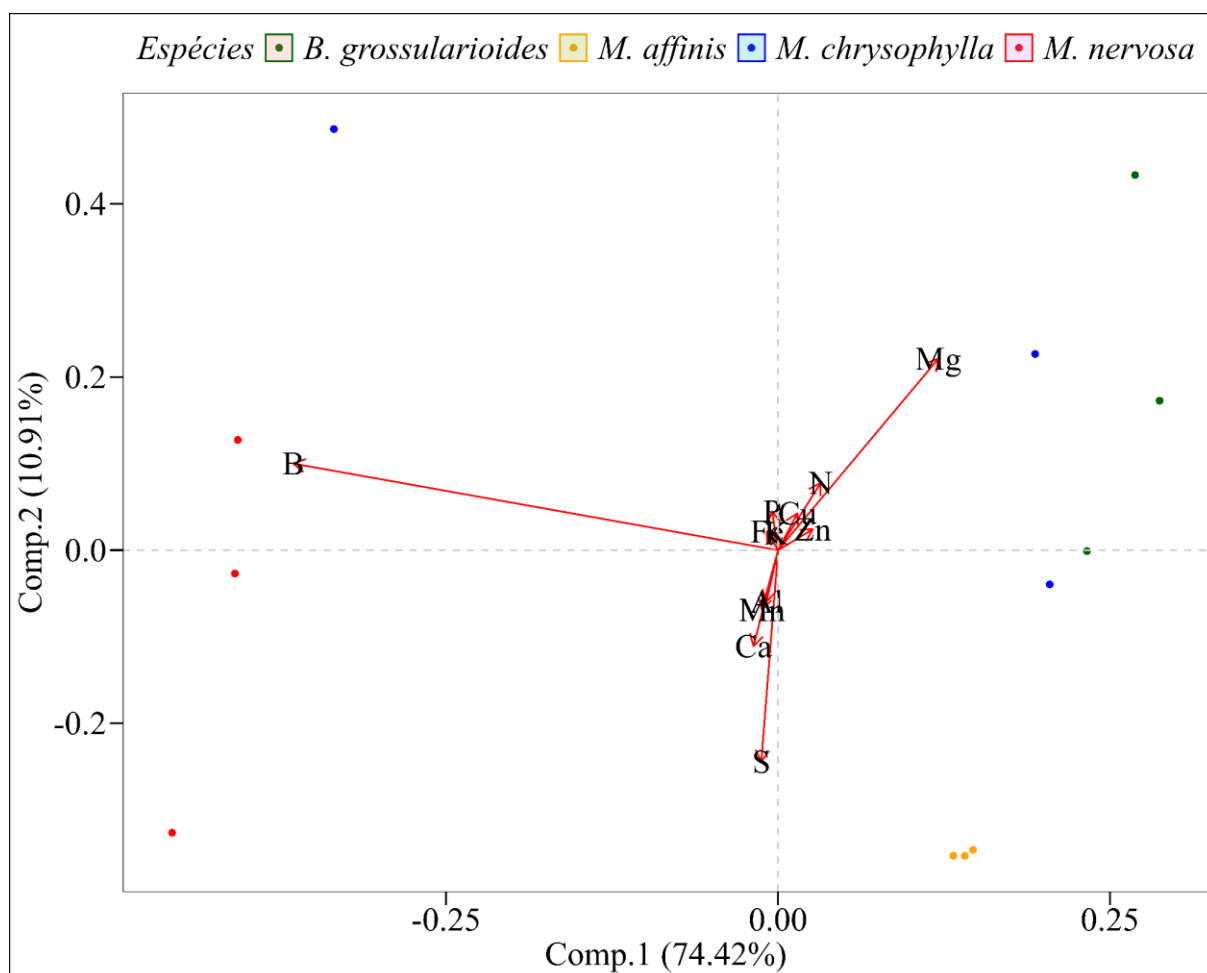
**Figura 2.** Teor de Al nas espécies de Melastomataceae. A - Teores médios de Al acumulado conforme análise de variância (ANOVA). B - Comparação dos teores de Al acumulado entre pares, baseada nas diferenças de níveis médios pelo teste de Tukey

Apesar do destaque de *M. affinis* no acúmulo de Al, a relação entre o Al disponível no solo e o Al acumulado pelas plantas não foi significativa. O teste de correlação de Pearson revelou que, para as amostras advindas da Boca do Iriri, uma correlação fraca e positiva ( $r = 0,226$ ) para a concentração de Al entre as amostras é estabelecida, porém sem significância estatística ( $p = 0,667$ ). Para a ESEC Terra do Meio, a correlação do Al entre as variáveis analisadas foi moderada a forte ( $r = 0,719$ ), mas também não apresentou significância estatística ( $p = 0,108$ ).

Para os demais elementos químicos, foram identificadas concentrações médias relativamente altas de N e Ca na matéria seca de todas as plantas, enquanto teores baixos foram observados para B (Tabela 3). A PCA, além de explicar a variação desses e de outros elementos a partir da matéria seca das amostras, destacou, por meio da ordenação e da estrutura de correlação dos dados, os elementos mais significativos entre as espécies. Nesse contexto, a PCA, por meio de seus dois primeiros componentes, explicou 85,33% da variação na concentração dos nutrientes e de Al nas plantas. O primeiro eixo, detentor da maior significância, foi formado predominantemente pelas variáveis Mg (-0.941) e B (0.311). Em contrapartida, o segundo componente foi constituído principalmente por S (-0.630), Mg (0.570) e Ca (-0.286) (Figura 4).

A partir da ordenação dos dados, foram identificadas correlações positivas entre N, Cu, Zn e, principalmente, Mg nos espécimes de *B. grossularioides* e *M. chrysophylla*. Em contrapartida, as menores concentrações de B foram observadas nessas duas espécies, uma

vez que é observada uma correlação negativa com o micronutriente. Por outro lado, concentrações de B são altas em *M. nervosa*. Para essa espécie, outros nutrientes, como S, Ca, Mn, além do Al, também apresentam concentrações relativamente altas. Já *M. affinis*, o grupo mais homogêneo em termos de características químicas com base na sua ordenação, exibe correlações positivas e negativas semelhantes às de *M. nervosa*, exceto no caso de B (Figura 4).



**Figura 4.** Análise de componentes principais dos elementos químicos da matéria seca foliar das quatro Melastomataceae estudadas

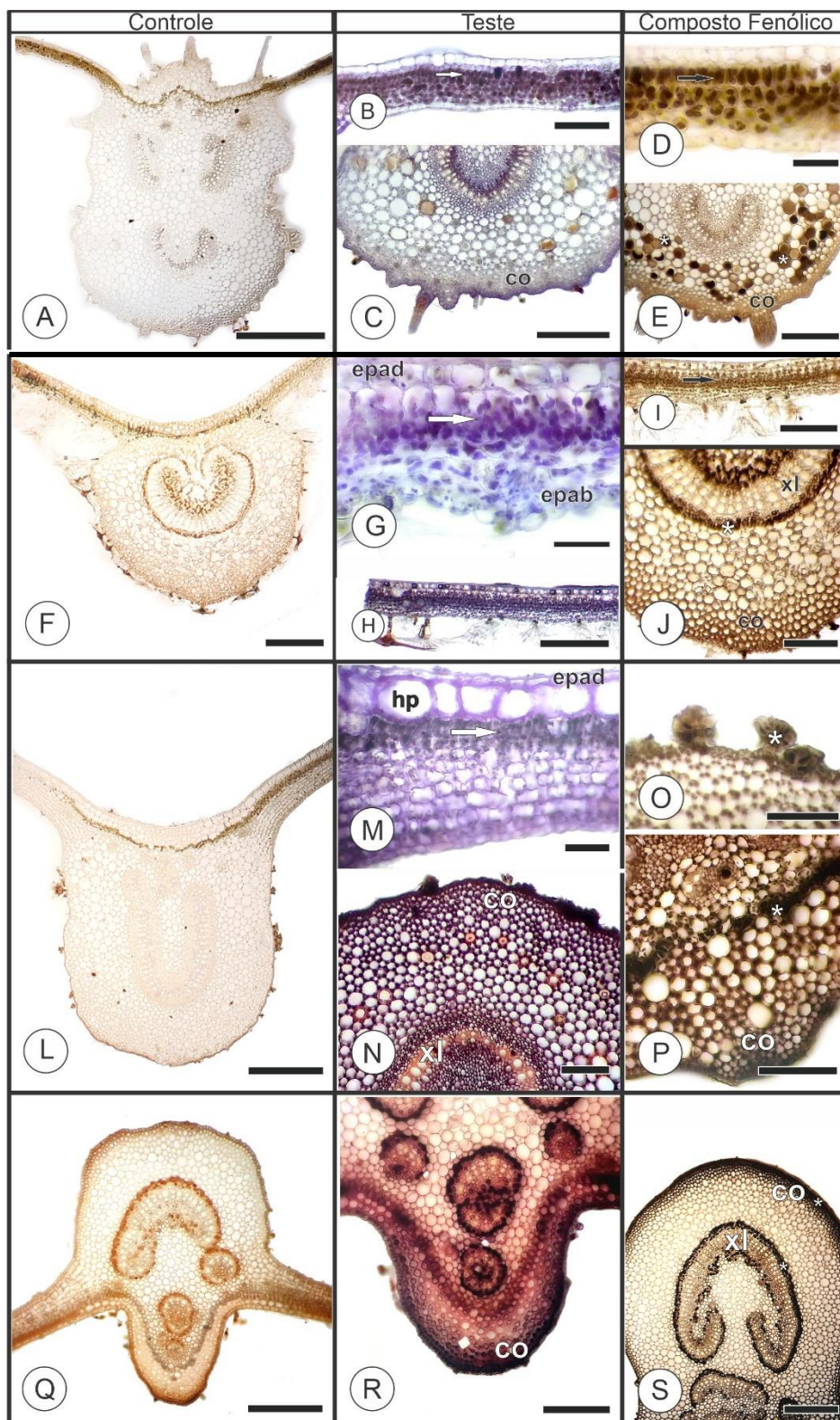
### Histoquímica de Alumínio e Compostos Fenólicos

O alumínio foi identificado nos tecidos foliares das quatro espécies analisadas. Em todas as espécies do gênero *Miconia*, o metal foi detectado por ambos os testes histoquímicos empregados, enquanto, na espécie do gênero *Bellucia*, apenas o teste com Hematoxilina resultou em reação positiva (Tabela 4).

As espécies do gênero *Miconia* apresentaram padrões semelhantes de sítios de acúmulo de Al, com a presença do metal detectada predominantemente nas paredes celulares da epiderme, tricomas, colênquima, parênquima paliçádico e floema em todas as três espécies analisadas (Figura 5). Por sua vez, em *M. nervosa* a hematoxilina revelou a presença do metal em idioblastos secretores da nervura central. Em *M. chrysophylla*, o Chrome Azurol detectou Al nos cloroplastos, enquanto a hematoxilina revelou sua presença nas células da escama dos tricomas peltados. Outra diferença de locais de acúmulo foi em *M. affinis*, foi detectado Al na parede das células da hipoderme em ambos os reagentes.

Em *Bellucia grossularioides*, o Al foi detectado na parede celular da epiderme da nervura central, no colênquima, além da bainha do feixe vascular. Os locais de acúmulo observados foram similares aos das espécies do gênero *Miconia*, com a particularidade de que o reagente Chrome Azurol S não apresentou reação na planta analisada.

Na detecção de compostos fenólicos, todas as espécies analisadas apresentaram reação positiva, com maior intensidade nos idioblastos secretores e tricomas (Figura 5). Especificamente em *M. affinis*, além das áreas citadas, os compostos fenólicos foram localizados nos tricomas e no parênquima paliçádico. Em *M. chrysophylla*, a reação positiva foi na bainha e no parênquima medular do feixe vascular.



**Figura 5.** Histoquímica das folhas de quatro espécies de *Melastomataceae*. *Miconia nervosa* (A-E); *Miconia chrysophylla* (F-J); *Miconia affinis* (L-P) e *Bellucia grossularioides* (Q-S). Controle (A, F, L, Q), localização de alumínio (B-R) e compostos fenólicos (D-S). **Seta:** detecção de alumínio; \* detecção de compostos fenólicos. **Abreviações:** XI – xilema; epad – epiderme adaxial; epba – epiderme abaxial; hp – hipoderme; co – colêquima. **Escala:** A,L, Q, S - 300µm; B - 60 µm; C,E,H, I, J,R- 150 µm; F -200 µm; G,O - 30 µm; N,P - 100 µm.

**Tabela 4.** Sítios de deposição de Al e Compostos fenólicos nos tecidos foliares de quatro espécies de Melastomataceae da Amazônia brasileira. “+” indica a presença de componentes químicos no tecido

Região	Tecido	Estrutura	Espécie												
			<i>Miconia affinis</i>			<i>Miconia nervosa</i>			<i>Miconia chrysophylla</i>			<i>Bellucia grossularioides</i>			
			Testes												
			HX	CA	CF	HX	CA	CF	HX	CA	CF	HX	CA	CF	
<b>Epiderme</b>		Parede celular	+	+		+	+		+	+					
<b>Hipoderme</b>		Parede celular	+	+											
<b>Mesofilo</b>		Vacúolo		+											
		Tricoma		+	+	+	+		+		+				
	Parênquima paliçádico	Parede celular	+	+	+	+	+	+	+	+	+				
		Vacúolo	+	+	+	+	+	+							
		Cloroplasto									+				
	Parênquima esponjoso	Parede celular	+												
Vacúolo															
<b>Nervura central</b>		Parede celular		+								+		+	
	Colênquima	Parede celular	+	+					+	+		+		+	
		Vacúolo		+								+		+	
	Parênquima medular								+	+	+				
	Parênquima preenchimento	Parede celular	+												
		Vacúolo													
		Idioblasto				+		+				+			
Floema		+			+	+		+	+						
Bainha do feixe								+	+	+	+		+		

\*HX = Hematoxilina; CA = Chrome Azurol-S; CF = Cloreto Férrico

## Discussão

### Caracterização química do solo e das plantas

Solos ácidos geralmente apresentam altas concentrações de  $\text{Al}^{3+}$  e baixas quantidades dos cátions básicos  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , essenciais para o crescimento das plantas (Brunner e Sperisen, 2013). No entanto, as concentrações de Al registradas em ambas as áreas de estudo são substancialmente baixas para serem consideradas fitotóxicas (Sobral et al., 2015). Por outro lado, os níveis médios dos cátions básicos do solo, como Ca, e de alguns elementos essenciais também são reduzidos (Sobral et al., 2015; Rebêlo et al., 2020).

A baixa disponibilidade de recursos nutricionais nos solos não é um fenômeno exclusivo da região analisada, mas um padrão frequentemente observado em diversas partes da Amazônia (Zaninetti et al., 2016; Rebêlo et al., 2020; Garzón e Pena-Venegas, 2023). Segundo Rebêlo et al. (2020), essa condição pode ser explicada pela limitada concentração desses elementos no material de origem dos solos e pela lixiviação resultante do intenso intemperismo, refletindo a pobreza nutricional característica dos solos amazônicos.

Por outro lado, os altos teores médios de Fe e Mn destacam a dualidade desses solos, uma vez que, embora nutricionalmente pobres, apresentam um elevado estoque de elementos metálicos, especialmente de Fe (Cordani e Juliani, 2019; Silva et al., 2024). Esse aspecto, aliado à acidez do solo, pode explicar a alta concentração desses dois metais, pois, em solos com pH baixo, como os das áreas amostradas, a disponibilidade de Fe e Mn tende a aumentar devido à maior solubilidade de seus compostos, uma característica comum em ambientes tropicais (Silva e Berti, 2022; Ye et al., 2022).

No caso das plantas, as altas concentrações de Al nos tecidos foliares das quatro espécies investigadas evidenciam que o acúmulo de alumínio ocorre independentemente da disponibilidade do metal no solo, dada a baixa concentração do elemento nas amostras coletadas nas áreas de estudo. Essa observação é consistente com estudos de espécies acumuladoras de Al no Cerrado (Andrade et al., 2011; Nogueira et al., 2019), demonstrando que determinados caracteres são compartilhados entre Al-acumuladores em distintas vegetações.

No que tange à hiperacumulação de Al, essa é uma característica já conhecida entre algumas espécies de Melastomataceae. Por exemplo, foram medidos 66.100 mg/kg nas folhas de *Miconia acinodendron* (L.) Tr., 48.843 mg/kg em *Melastoma malabathricum* L., e 16.640 mg/kg em *Pternandra coerulescens* Jack (Chenery, 1948; Masunaga et al., 1998; Kutty e Al-Mahaqeri, 2016). Portanto, essa não é uma característica nova no grupo de plantas estudadas.

Todavia, este trabalho registra pela primeira vez a acumulação de Al em *M. chrysophylla* e *M. affinis*. Enquanto o acúmulo do metal em *Miconia nervosa* e *Bellucia grossularioides* já foi descrito anteriormente por Chenery (1946) e Olivares et al. (2010) em solos do Caribe e da Venezuela, respectivamente. Entretanto, nesses solos *M. nervosa* acumulou cerca de 9.160 mg/kg de Al, enquanto, *B. grossularioides* acumulou 3.000 mg/kg de Al na matéria seca (Chenery, 1946; Olivares, 2010), valores inferiores ao que foi encontrado na Amazônia brasileira, já que *B. grossularioides* acumulou em média  $17.256,63 \pm 3175.3981$  e *M. nervosa*  $20.868,28 \pm 605.4828$  mg/kg de Al na matéria seca foliar em nosso estudo.

Em relação aos demais elementos químicos, a composição nutricional das espécies analisadas diferiu pontualmente daquela registrada para outras Melastomataceae acumuladoras de Al em solos ácidos. Nossas amostras apresentaram concentrações mais elevadas de elementos como Ca e K, enquanto os teores de Fe e Mn, por exemplo, apresentaram valores próximos aos relatados para outras espécies desta família de plantas (Haridasan e Araújo, 1987; Haridasan, 1988; Olivares et al., 2010).

Entre os nutrientes analisados, destacam-se particularmente o N e o Ca, cujos teores médios foram relativamente altos em comparação com outras variáveis químicas da matéria seca vegetal obtida das quatro espécies estudadas. Esses valores são semelhantes aos considerados ideais para plantas de uso agrícola (Sengik, 2003; Ronquim, 2010). No caso do Ca, observa-se um comportamento similar ao do Al. Embora o metal alcalino-terroso seja encontrado em baixas concentrações no solo, seus teores no tecido foliar das amostras são altos, indicando que, apesar dessa circunstância, as plantas estão em estado nutricional adequado para o elemento. Esta situação é favorável, pois reforça o entendimento de que plantas acumuladoras de Al não apresentam limitações na absorção de nutrientes essenciais em comparação com plantas não acumuladoras, e o Al não inibe seu crescimento (Haridasan, 2008; Liu et al., 2020).

Diferentemente do que foi observado para N e Ca, os teores de K estiveram abaixo dos valores de suficiência geralmente recomendados para plantas cultivadas (Sengik, 2003; Ronquim, 2010). O potássio é essencial para ativar diversas enzimas responsáveis por processos vitais como síntese de proteínas, transporte de açúcares e até mesmo a fotossíntese (Xu et al., 2020; Kumari et al., 2022). Baixas concentrações ou deficiência desse elemento podem resultar em desenvolvimento deficiente dos órgãos vegetativos, diminuição dos teores de clorofila e pigmentos carotenoides, além do aparecimento de clorose, como observado em *Ocimum basilicum* L. (Xu et al., 2020). A baixa concentração desse nutriente nas plantas pode

estar associada à sua reduzida disponibilidade no solo, conforme indicam os dados edáficos das áreas onde as amostras foram coletadas. No entanto, também é possível que esse padrão reflita interações com o Fe, cujos teores superaram moderadamente o limite considerado ideal para espécies de interesse agrônômico (Sengik, 2003; Ronquim, 2010; Li et al., 2024).

Em concentrações excessivas, o Ferro é prejudicial para as plantas, podendo reagir com o peróxido de hidrogênio e desencadear a formação de radicais hidroxila nocivos. Esses radicais promovem a peroxidação de lipídios da membrana celular e proteínas, causando danos que comprometem a estrutura e a função das células vegetais (Schmidt et al., 2020; Tavares et al., 2020). Em *Arabidopsis*, o excesso de Fe aumenta a produção de óxido nítrico (NO), resultando em uma perda significativa de K (Zhang et al., 2018). O potássio desempenha um papel importante no contexto de sinalização de NO sob condições de excesso de Fe (Li et al., 2024). No entanto, não é possível afirmar se o déficit de potássio observado em nossas amostras foi causado pela presença de Fe. Estudos adicionais são necessários para investigar as possíveis causas dessa ocorrência e elucidar os mecanismos subjacentes.

Concentrações moderadamente superiores de cobre (Cu) e Mn também foram encontradas nas amostras (Sengik, 2003; Ronquim, 2010). Ambos os metais são necessários em vários processos fisiológicos e bioquímicos nas plantas, desempenhando papéis cruciais na respiração mitocondrial, fotossíntese e metabolismo da parede celular (Mir et al., 2021; Wege, 2022). No entanto, em excesso, podem prejudicar as plantas. O Cu, por exemplo, interrompe a membrana celular da cutícula radicular, inibe a produção de pêlos radiculares e altera a área foliar e o tamanho do caule (Mir et al., 2021). O Mn pode gerar efeitos adversos semelhantes aos do Cu e do Fe. Em estudos com arroz, o excesso de Mn inibiu a assimilação de CO<sub>2</sub> devido ao fechamento estomático, afetando processos anabólicos e catabólicos. Além disso, foram observadas alterações anatômicas e no desenvolvimento foliar (Takagi et al., 2021).

Essa condição pode ser resultado da disponibilidade diferenciada desses elementos no solo, especialmente para Fe e Mn, que também apresentam teores elevados nas duas áreas de estudo. Assim, tanto o excesso de metais quanto a deficiência de outros evidenciam como o desequilíbrio de nutrientes pode impactar significativamente o desenvolvimento das plantas. Contudo, não é possível afirmar se o crescimento das espécies estudadas foi diretamente influenciado pelas concentrações dos elementos químicos avaliados, o que ressalta a necessidade de investigações mais detalhadas.

Por outro lado, a PCA revela que Mg, B e S foram os contribuintes químicos mais significativos na variação nutricional das plantas com base na matéria seca. Embora a

concentração de Mg nas folhas dependa das espécies (Hauer-Jákli e Tränkner, 2019; Tian et al., 2021), este nutriente destacou-se por sua relevância, especialmente em *B. grossularioides* e *M. chrysophylla*. O magnésio é um elemento essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, além de ser um componente vital da clorofila (Verbruggen e Hermans, 2013; Tian et al., 2021). A forte negatividade do Mg no primeiro componente da PCA indica que suas variações podem estar relacionadas a limitações ou excedentes desse nutriente em determinadas espécies, em particular nas duas espécies mencionadas.

O B e o S, apesar de apresentarem menor contribuição nos eixos da PCA, desempenham papéis importantes na fisiologia das plantas. O boro, presente principalmente na parede celular das plantas, se distingue de outros minerais essenciais, pois não faz parte da composição química das enzimas e não participa diretamente das reações redox, como ocorre com elementos como Fe e S (Long e Peng, 2023). Níveis saudáveis do elemento estimula o desenvolvimento dos tecidos reprodutivos, melhora a qualidade das sementes, além de contribuir no tráfego de íons através das membranas, divisão celular e alongamento (Vera-Maldonado et al., 2024). Por outro lado, o enxofre é crucial para a produção de aminoácidos e regulação de proteínas e enzimas, especialmente no controle redox. Também está envolvido na formação de metabolitos secundários e no crescimento e desenvolvimento das plantas, atuando como componente estrutural em ligações de dissulfeto de proteínas, aminoácidos, vitaminas e cofatores (Kopriva et al., 2019; Narayan et al., 2023).

Esses elementos, portanto, interagem de maneira dinâmica, com padrões semelhantes entre espécies de diferentes áreas, como observado em *M. nervosa* e *M. affinis*, mas também apresentam diferenças entre espécies da mesma área. Essa variabilidade reflete as adaptações das plantas às condições ambientais e nutricionais do solo. Assim, embora a disponibilidade dos elementos no solo seja um fator importante, é fundamental considerar a interação específica de cada espécie com os nutrientes para compreender os impactos no seu desenvolvimento.

### **Histoquímica de Alumínio e Compostos Fenólicos**

Dentre os sítios de acumulação de Al identificados, a parede celular que compõe os diferentes tecidos foliares é comum entre as espécies analisadas. A parede celular é o primeiro local de contato com o Al e também o principal alvo da toxicidade desse elemento (Yang et al., 2011; Kocjan et al., 2024). A alta afinidade entre o Al e os grupos carboxila livres de pectina e hemicelulose permite a imobilização do metal nessa estrutura (Wehr et al., 2010; Yang et al., 2011; Hajiboland et al., 2023b). Em plantas acumuladoras de Al, a parede celular

atua como um local de sequestro do elemento químico nas folhas, evitando, assim, que ele entre em contato direto com estruturas responsáveis por processos bioquímicos essenciais (Grevenstuk e Romano, 2013).

Além das paredes celulares, a presença de alumínio nos tecidos da epiderme, especialmente nas folhas, é comumente observada entre as espécies acumuladoras do metal (Andrade et al., 2011; Campos et al., 2014; Malta et al., 2016; Lu et al., 2023). Nossos achados destacam o papel crucial dessa estrutura na tolerância ao Al entre essas plantas. O depósito de alumínio nas células da epiderme pode ser resultado do fluxo de transpiração, com o Al sendo depositado à medida que a água evapora (Hajiboland e Poschenrieder, 2015). Uma das vantagens dessa estratégia pode ser o isolamento do Al das células com atividade fotossintética (Grevenstuk e Romano, 2013). No entanto, a presença de Al em cloroplastos foi detectada em *Miconia chrysophylla*, uma das espécies investigadas em nosso estudo.

O acúmulo de Al em tecidos mesofílicos, como células paliçádicas e esponjosas das folhas e até mesmo em organelas tão especializadas como os cloroplastos, foi identificado em outros acumuladores, como *Qualea grandiflora* Mart., *Callisthene major* Mart. & Zucc. *Miconia rubiginosa* (Bonpl.) DC. e *Camellia oleifera* Abel (Andrade et al., 2011; Bressan et al., 2016; Lu et al., 2023). Além disso, embora a presença de Al seja relatada em cloroplastos de algumas espécies, a participação dessa organela no processo de acumulação de Al é incomum. Assim, a razão para a presença do metal nos cloroplastos ainda não foi determinada (Castro et al., 2022).

Para além dos tecidos de preenchimento, o Al também pode ser encontrado em tecidos de sustentação, como o colênquima. Haridasan et al. (1986) observaram altas concentrações de Al tanto nas paredes celulares quanto no conteúdo do colênquima em espécies do Cerrado. Além disso, o Al foi identificado nos tricomas das espécies de Melastomataceae estudadas. Os tricomas são estruturas especializadas derivadas da camada celular epidérmica e podem desempenhar diversas funções, dependendo da espécie e do órgão da planta (Küpper et al., 2000; Simplício et al., 2022). A presença de Al nos tricomas já foi relatada em outros acumuladores de Al (Hajiboland e Poschenrieder, 2015; Malta et al., 2016), incluindo a secreção do metal por essas estruturas, como é o caso de *Andropogon virginicus* L. (Ezaki et al., 2013). O acúmulo e a secreção de metais pelos tricomas têm sido sugeridos como mecanismos eficazes para manter níveis não tóxicos de metais nas plantas (Ezaki et al., 2013).

Além dos tecidos mais superficiais, o Al também é frequentemente armazenado nos tecidos mais internos das plantas, como os de condução e os associados a eles (Haridasan et al., 1986). O xilema é a principal via de transporte envolvida na translocação de Al

(Poschenrieder et al., 2015). Entretanto, o Al também pode ser redistribuído via floema (Zeng et al., 2013; Schmitt et al., 2016). Assim, a presença do metal evidenciada nas células do floema nas Melastomataceae deste estudo a partir dos testes histoquímicos usados não é incomum. O transporte de Al via floema é essencial para distribuir e armazenar o metal em vários órgãos vegetais (Castro et al., 2022). Em muitas plantas tolerantes, esse mecanismo de redistribuição atua como uma estratégia para evitar o acúmulo excessivo de Al em uma determinada região, minimizando os danos que esse elemento pode causar ao metabolismo da planta (Larsen et al., 2005; Nezames et al., 2012).

Uma estratégia importante adotada pelas plantas em nosso estudo, e comumente adotada por outras espécies Al-acumuladoras para a imobilização de Al, é a secreção de compostos fenólicos. Esses compostos podem complexar o Al livre nos tecidos vegetais, contribuindo para a resistência ao metal (Ofei-Manu et al., 2001; Tolrà et al., 2005). A ação desses compostos é particularmente evidente nas raízes de plantas lenhosas tropicais que acumulam Al, como em *Vochysia tucanorum* Mart. e *Q. grandiflora*, por meio da expressão de quantidades significativas de ácido quínico, precursor de importantes fenóis, como ácidos clorogênicos (Ofei-Manu et al., 2001; Souza et al., 2017; Cury et al., 2020). Todavia, esses compostos também fazem parte das estratégias de imobilização do metal em tecidos foliares, como no caso da espécie *Rudgea viburnoides* (Cham.) Benth. (Malta et al., 2016). A presença desses compostos nos mesmos locais de acumulação de Al destaca sua importância na quelação do metal.

Neste sentido, a acumulação de Al nessas estruturas reforça a existência de estratégias de exclusão e tolerância nos níveis celulares das plantas acumuladoras de Al e destaca a participação e importância de compostos orgânicos, como os fenóis, para lidar com a toxicidade do Al. Essa complexa interação evidencia as estratégias adaptativas das plantas para superar as adversidades impostas pelo meio em que vivem e nos fornece insights valiosos para a compreensão da adaptação vegetal em condições de solos ácidos.

Os dados químicos do solo revelam a pobreza nutricional dos solos amazônicos e refletem uma dualidade em relação à disponibilidade de elementos como Fe e Mn. Apesar dessa limitação, o desenvolvimento das plantas não é afetado. As concentrações de metais nas folhas, especialmente de Al e Ca, ocorrem de maneira independente da disponibilidade desses elementos no solo. Ainda assim, uma elevada concentração para ambos os elementos foi aferida para todas as espécies estudadas. A acumulação de Al em espécies como *M. nervosa* e *B. grossularioides* é reafirmada, com valores consideravelmente superiores aos de outras regiões com características edáficas semelhantes. Além disso, este estudo representa o

primeiro registro de acumulação e hiperacumulação de Al em *M. affinis* e *M. chrysophylla*. A histoquímica do Al e dos compostos fenólicos evidencia as estratégias similares adotadas por diferentes espécies para a imobilização e quelação do Al. A parede celular da epiderme, colênquima e parênquima paliçádico são os principais sítios de armazenamento de Al.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) pelo financiamento da bolsa de nível de mestrado concedida. Ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação da UFPA pelo auxílio financeiro PROAP. Agradecemos ainda ao grupo de pesquisa Amazon Research Team da University of Turku, Finlândia, que nos cedeu dados de solo e forneceu subsídios para a realização da etapa de campo deste estudo.

### Referências

- Ab'Saber N (2002) Bases para o estudo dos ecossistemas da Amazônia Brasileira. *Estudos Avançados* 16 (45): 7-30.
- Andrade L, Barros L, Echevarria G, do Amaral L, Cotta M, Rossatto D, Haridasan M, Franco AC (2011) Al-Hyperaccumulator Vochysiaceae from the Brazilian Cerrado store aluminum in their chloroplasts without apparent damage. *Environ Exp Bot*, 70: 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.05.013>.
- Brasil (2005) Decreto de 17 de fevereiro de 2005. Cria a Estação Ecológica da Terra do Meio, nos Municípios de Altamira e São Félix do Xingu, Estado do Pará, e dá outras providências. *Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF*. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2005/Dnn/Dnn10450.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Dnn/Dnn10450.htm).
- BFG (2021) Brazilian Flora 2020: Leveraging the power of a collaborative scientific network. *TAXON*, 71: 178-198. <https://doi.org/10.1002/tax.12640>.
- Bressan A, Coan A, Habermann G (2016) X-ray spectra in SEM and staining with chrome azurol S show Al deposits in leaf tissues of Al-accumulating and non-accumulating plants from the Cerrado. *Plant and Soil*, 404(1–2): 293–306. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2841-1>.
- Brunner I, Sperisen C (2013) Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. *Frontiers in Plant Science*, 4: 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00172>.
- Campos N, Pereira T, Machado M, Guerra M, Tolentino G, Araújo J, Rezende M, Silva M, Schaefer C (2014) Evaluation of micro-energy dispersive X-ray fluorescence and histochemical tests for aluminium detection in plants from High Altitude Rocky Complexes, Southeast Brazil. *An Acad Bras Cienc*. 86(1): 285-96. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201402012>.
- Carvalho-Júnior W (2012) Avaliação de técnicas de histolocalização do alumínio em folhas de espécies de Cerrado. Dissertation, Universidade Federal de Viçosa.
- Castro L, Vinson C, Gordo S, Williams T, Cury N, Souza M, Pereira, L. 2022. Molecular and physiological aspects of plant responses to aluminum: what do we know about Cerrado plants? *Revista Brasileira de Botânica*, 45: 545–562. DOI: 10.1007/s40415-022-00751-2.

- Chagas Junior A, Oliveira L, Oliveira N (2009) Tolerância à acidez e alumínio tóxico por isolados de rizóbios de solos no Amazonas, Brasil. *Acta Amaz.* 39(2): 467 – 470. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000200028>.
- Chauhan, D, Yadav V, Vaculík M, Gassmann W, Pike S, Arif N, Singh V, Deshmukh R, Sahi S, Tripathi D (2021) Aluminum toxicity and aluminum stress-induced physiological tolerance responses in higher plants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41 (5): 715–730. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1874282>.
- Chenery E (1946) Are *Hydrangea* Flowers Unique?. *Nature*, 158: 240–241. <https://doi.org/10.1038/158240a0>.
- Chenery E (1948) Aluminium in the plant world, Part I. *Kew Bulletin* 3(2): 463-473. Published by Springer on behalf of Royal Botanic Gardens, Kew. Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/4119757>.
- Cordani U, Juliani C (2019) Potencial mineral da Amazônia: problemas e desafios. *Rev. Revista de Estudos Brasileños*, 6 (11): 91-108.
- Cury N, Silva R, Andre M, Fontes W, Ricart C, Castro M, Silveira C, Williams T, Sousa M, Pereira L (2020) Root proteome and metabolome reveal a high nutritional dependency of aluminum in *Qualea grandiflora* Mart. (Vochysiaceae). *Plant Soil* 446:125–143. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04323-3>.
- Domingos M, Klumpp, A, Rinaldi M, Modesto M, Klumpp G, Delitti W (2003) Combined effects of air and soil pollution by fluoride emissions on *Tibouchina pulchra* Cogn., at Cubatão, SE Brazil, and their relations with aluminium. *Plant and Soil* 249: 297–308. <https://doi.org/10.1023/A:1022800225753>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) (1997) Manual for methods of soil analyses, 2nd edn. Embrapa, Rio de Janeiro.
- Ezaki B, Jayaram K, Higashi A, Takahashi K (2013) A combination of five mechanisms confers a high tolerance for aluminum to a wild species of Poaceae, *Andropogon virginicus* L. *Environmental and Experimental Botany*, 93: 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.05.002>.
- Ferreira S, Crestana S, Luizão F, Miranda S (2001) Nutrientes no Solo em Floresta de Terra Firme Cortada Seletivamente na Amazônia Central. *Acta Amaz.* 31 (3). <https://doi.org/10.1590/1809-43922001313396>.
- Forzza R, Baumgratz J, Costa A, Hopkins M, Leitman P, Lohmann L, Martinelli G, Morim M, Coelho M, Peixoto A, Pirani J, Queiroz L, Stehmann J, Walter B, Zappi D. (2010) Introdução: as angiospermas do Brasil. Catálogo de plantas e fungos do Brasil [online]. Instituto de Pesquisa Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. <<http://books.scielo.org>>.
- Garzón L, Pena-Venegas C (2023) Arbuscular mycorrhizal characterization associated with *Uncaria guianensis* and *Uncaria tomentosa* in Amazonian soils. *Rev. Cienc. Agr.*, 40(2): e2207. <https://doi.org/10.22267/rcia.20234002.207>.
- Goldenberg R, Baumgratz J, Souza M (2012) Taxonomia de Melastomataceae no Brasil: retrospectiva, perspectivas e chave de identificação para os gêneros. *Rodriguésia* 63: 145-161.
- Grevenstuck T, Romano A (2013) Aluminium speciation and internal detoxification mechanisms in plants: where do we stand? *Metallomics*, 5(12): 1584-94. <https://doi.org/10.1039/c3mt00232b>.

- Hajiboland R, Poschenrieder C (2015) Localization and compartmentation of Al in the leaves and roots of tea plants. *Phyton*, 84: 86-100. <https://doi.org/10.32604/phyton.2015.84.086>.
- Hajiboland R, Panda C, Lastochkina O, Gavassi M, Habermann G, Pereira J (2023a) Aluminum Toxicity in Plants: Present and future. *J Plant Growth Regul*, 42: 3967–3999. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10866-0>.
- Hajiboland R., A. Moradi, E. Kahneh, C. Poschenrieder, F. Nazari, J. Pavlovic, R. Tolra, S-Y S-L & M. Nikolic. 2023b. Weed Species from Tea Gardens as a Source of Novel Aluminum Hyperaccumulators. *Plants*, 12: 2129. <https://doi.org/10.3390/plants12112129>.
- Haridasan M, Paviani T, Schiavini I (1986) Localization of aluminium in the leaves of some aluminium-accumulating species. *Plant and Soil* 94,435-437. <https://doi.org/10.1007/BF02374336>.
- Haridasan M. (1988). Performance of *Miconia albicans* (sw.) Triana, na aluminum accumulating species, in acidic and calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19: 7-12, 1091-1103. <https://doi.org/10.1080/00103628809367997>.
- Haridasan M (2008) Nutritional adaptations of native plants of the Cerrado biome in acid soils. *Braz J Plant Physiol*, 20: 183–195. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202008000300003>.
- Hauer-Jákli M and Tränkner M (2019) Critical Leaf Magnesium Thresholds and the Impact of Magnesium on Plant Growth and Photo-Oxidative Defense: A Systematic Review and Meta-Analysis From 70 Years of Research. *Front. Plant Sci.*, 10: 766. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00766>.
- Jansen S, Broadley MR, Robbrecht E, Smets E (2002a) Aluminum hyperaccumulation in angiosperms: A review of its phylogenetic significance. *Botanical Review* 68(2): 235–269. <https://doi.org/10.1007/BF02858431>.
- Jansen, S., T. Watanabe & E. Smets (2002b) Aluminium Accumulation in Leaves of 127 Species in Melastomataceae, with Comments on the Order Myrtales, *Annals of Botany*, 90: 53–64. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf142>.
- Jansen S, Watanabe T, Dessen S, Smets E, Robbrecht E (2003) A comparative study of metal levels in leaves of some Al-accumulating Rubiaceae. *Annals of Botany* 91(6): 657–663. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg071>.
- Johansen DA (1940) *Plant Microtechnique*. New York.
- Kocjan A, Kwasniewska J, Szurman-Zubrzycka M (2024) Understanding plant tolerance to aluminum: exploring mechanisms and perspectives. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06745-0>.
- Kopriva S, Malagoli M, Takahashi H (2019) Sulfur nutrition: impacts on plant development, metabolism, and stress responses. *Journal of Experimental Botany*, 70 (16): 4069–4073. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz319>.
- Kraus J, Arduin M (1997) *Manual básico de métodos em morfologia vegetal*. Eduir, Rio de Janeiro.
- Kukachka B, Miiier R (1980) A Chemical Spot-Test for Aluminum and its Value in Wood Identification. *IAWA Bulletin* 1(3): 104-109.
- Kumari V, Banerjee P, Verma V, Sukumaran S, Chandran M, Gopinath K, Venkatesh G, Yadav S, Singh V, Awasthi N. (2022) Plant Nutrition: An Effective Way to Alleviate Abiotic Stress in Agricultural Crops. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15): 8519. <https://doi.org/10.3390/ijms23158519>.

- Küpper H, Lombi E, Zhao F, McGrath S (2000) Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Planta*, 212: 75–84. <https://doi.org/10.1007/s004250000366>.
- Kutty A, Al-Mahaqeri S (2016) An Investigation of the Levels and Distribution of Selected Heavy Metals in Sediments and Plant Species within the Vicinity of Ex-Iron Mine in Bukit Besi. *Journal of Chemistry*: 1-12. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/2096147>.
- Larsen P, Geisler M, Jones C, Williams K, Cancel J (2005) ALS3 encodes a phloem-localized ABC transporter-like protein that is required for aluminum tolerance in *Arabidopsis*. *Plant J* 41:353–363. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-313X.2004.02306.x>.
- Li G, Wu J, Kronzucker HJ, Li B, Shi W (2024) Physiological and molecular mechanisms of plant-root responses to iron toxicity. *J Plant Physiol.*, 297: 154257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2024.154257>.
- Liu Y, Tao J, Cao J, Zeng Y, Li X, Ma J, Huang Z, Jiang M, Sun L (2020) The Beneficial Effects of Aluminum on the Plant Growth in *Camellia japonica*. *J Soil Sci Plant Nutr* 20: 1799–1809. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00251-9>.
- Long Y, Peng J (2023) Interaction between Boron and Other Elements in Plants. *Genes (Basel)*, 14(1): 130. <https://doi.org/10.3390/genes14010130>.
- Lu J, Q, X, Li J, Li Z, Yuan J (2023) Characteristics of Aluminum Accumulation and Distribution in Leaves of Different Ages in *Camellia oleifera*. *Forests*, 14(12): 2322. <https://doi.org/10.3390/f14122322>.
- Malta P, Arcanjo-Silva S, Ribeiro C, Campos N, Azevedo A (2016) *Rudgea viburnoides* (Rubiaceae) overcomes the low soil fertility of the Brazilian Cerrado and hyperaccumulates aluminum in cell walls and chloroplasts. *Plant Soil*, 408: 369–384. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2926-x>.
- Masunaga T, Kubota D, Hotta M, Wakatsuki T (1998) Mineral composition of leaves and bark in aluminum accumulators in a tropical rain forest in Indonesia, *Soil Science and Plant Nutrition*, 44 (3):347-358. <http://dx.doi.org/10.1080/00380768.1998.10414456>.
- Matsumoto H (2000) Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. *Int Rev Cytol* 200:1–46. doi: 10.1016/s0074-7696(00)00001-2.
- Michelangeli F, Almeda F, Penneys D, Goldenberg R (2020) A Guide to Curating New World Melastomataceae Collections with a Linear Generic Sequence to World-Wide Melastomataceae. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202010.0203.v1>.
- Mir A, Pichtel J, Hayat S (2021) Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil. *Biometals*, 34: 737–759. <https://doi.org/10.1007/s10534-021-00306-z>.
- Narayan OP, Kumar P, Yadav B, Dua M, Johri AK (2023) Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signal Behav.*, 18(1): 2030082. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>.
- Nazari F, Hajiboland R, Salehi-Lisar S, Kahneh E, Moradi A, Poschenrieder C (2023) Aluminum accumulation in *Amaranthus* species and mechanisms of Al tolerance. *Biologia*, 78: 2029–2047. <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01348-z>.
- Nezames C, Sjogren C, Barajas J, Larsen P (2012) The *Arabidopsis* cell cycle checkpoint regulators TANMEI/ALT2 and ATR mediate the active process of aluminum-dependent root growth inhibition. *Plant Cell* 24:608–621. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.095596>.

- Nogueira M, Bressan A, Pinheiro M, Habermann G (2019) Aluminum-accumulating Vochysiaceae species growing on a calcareous soil in Brazil. *Plant Soil*, 437: 313–326. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03978-2>.
- Ofei-Manu P, Wagatsuma T, Ishikawa S, Tawaraya K (2001) The plasma membrane strength of the root tip cells and root phenolic compounds are correlated with Al tolerance in several common woody plants. *Soil Sci Plant Nutr* 47:359–375. <https://doi.org/10.1080/00380768.2001.10408399>.
- Olivares E, Colonnello G, Peña E, Rodriguez L (2010) Aluminum accumulation in nineteen Melastomataceae species from three contrasting plant formations in acid soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 173: 453–460. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900152>.
- Oliveira L, Serudo R, Botero W, Mendonça A, Santos A, Rocha J, Carvalho Neto F (2007) *Quim. Nova* 30(2): 274-280. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000200006>.
- Poschenrieder, C., Tolrà, R., Hajiboland, R., Arroyave, C., Barceló, J. (2015). Mechanisms of Hyper-resistance and Hyper-tolerance to Aluminum in Plants. In: Panda, S., Baluška, F. (eds) *Aluminum Stress Adaptation in Plants. Signaling and Communication in Plants*, vol 24. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19968-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19968-9_5).
- Rahman, S, Han J, Ahmad M, Ashraf M, Khaliq M, Yousaf M, Wang Y, Yasin G, Nawaz M, Khan K, Du Z (2024) Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115791>.
- Rebêlo A, Monteiro M, Ferreira S, Eduardo Antonio Ríos-Villamizar E, Quesada C, Duvoisin Junior S (2020) Valores de Referência da Concentração de Metais Pesados em Solos na Amazônia Central. *Quim. Nova* 43 (5): 534-539. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170516>.
- Romão E, Pontes A, Gutjahr A, Torres W (2017) Análise Temporal do Uso e da Cobertura do Solo nas Áreas Desflorestadas do Município de Altamira, Pará. *Enciclopédia Biosfera*, 14 (25): 113-126. [http://dx.doi.org/10.18677/EnciBio\\_2017A11](http://dx.doi.org/10.18677/EnciBio_2017A11).
- Ronquim C (2010) Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas.
- Schmitt M, Boras S, Tjoa A, Watanabe T, Jansen S (2016) Aluminium Accumulation and Intra-Tree Distribution Patterns in Three *Arbor aluminosa* (*Symplocos*) Species from Central Sulawesi. *PLoS ONE*, 11(2): e0149078. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149078>.
- Schmidt W, Thomine S, Buckhout T (2020) Editorial: Iron Nutrition and Interactions in Plants. *Front. Plant Sci.* 10:1670. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01670>.
- Sengik E (2003) Os Macronutrientes e os Micronutrientes das Plantas.
- Silva A, Costa M, Botelho M, Furtado L, Batista V, Carneiro C, Morales G (2020) Impactos das alterações no uso e cobertura do solo no Município de Altamira, Pará. *Research, Society and Development*, 9(8): e303985488. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5488>.
- Silva S, Teixeira D, Silva R, Lisboa S, Rodrigues Y (2018) Atributos Físico-Químicos do Solo Submetidos a Supressão Vegetal, em Áreas de Reassentamento Urbano Coletivo Indígena, Altamira, Pará, Brasil. *Enciclopédia Biosfera*, 15 (28): 152-159. [https://doi.org/10.18677/EnciBio\\_2018B36](https://doi.org/10.18677/EnciBio_2018B36).
- Silva E, Pontes A, Paula M (2024) Compensação financeira pela exploração mineral na Amazônia brasileira à luz do direito ambiental: avanços e desafios. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, São José dos Pinhais, 17(5): 01-24. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.5-058>.

- Silva L, Berti M. (2022). Manganês no solo e nas plantas: uma revisão. *Scientific Electronic Archives*, 15(3): 21-25. <https://doi.org/10.36560/15320221512>.
- Simplício V, Conce M, Dallagnol L (2022) Tricomas: Defesa ou Vulnerabilidade para a Planta na Interação com Microrganismos?. *Revista Anual de Patologia das Plantas*, 28: 184-199. <https://doi.org/10.31976/0104-038321v280008>.
- Sobral L, Barretto M, Silva A, Anjos J (2015) Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju.
- Souza M, Habermann G, Amaral C, Rosa A, Pinheiro MHO, Costa FB (2017) *Vochysia tucanorum* Mart.: an aluminum accumulating species evidencing calcifuge behavior. *Plant Soil* 419:377–389. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3355-1>.
- Skorupa L, Costa U, Cunha P, Rossete A, Fidalgo E, Simões M, Pedreira B, Choueri R (2017) Monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Suiá-Miçu. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna.
- Takagi D, Ishiyama K, Suganami M, Ushijima T, Fujii T, Tazoe Y, Kawasaki M, Noguchi K, Makino A (2021) Manganese toxicity disrupts indole acetic acid homeostasis and suppresses the CO<sub>2</sub> assimilation reaction in rice leaves. *Sci Rep*, 11: 20922. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00370-y>.
- Tavares M, Sausen D, Schorr M, Marques A (2020) Estresse por ferro nas plantas: uma revisão de literatura. *Brazilian Journal of Development*, 6(5): 28825-28835. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-361>.
- Tedesco J, Gianello C, Bissani C, Bohnem H, Volkweiss S (1995) Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Ter Steege H, Vaessen R, Cárdenas-López D, Sabatier D, Antonelli A, Oliveira S, Pitman N, Jørgensen P, Salomão R (2016) The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. *Scientific Reports*, 6: 29549. <https://doi.org/10.1038/srep29549>.
- Tian XY, He DD, Bai S, Zeng WZ, Wang Z, Wang M, Wu LQ, Chen ZC (2021) Physiological and molecular advances in magnesium nutrition of plants. *Plant Soil*, 468: 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05139-w>.
- Timpone L, Habermann G (2022) Is aluminum (Al) eliminated by senescent structures of *Miconia albicans*, an Al-accumulating species from Brazilian savanna?. *Flora* 289: 152036. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2022.152036>.
- Tolrà R, Poschenrieder C, Luppi B, Barceló J (2005) Aluminium-induced changes in the profiles of both organic acids and phenolic substances underlie Al tolerance in *Rumex acetosa* L. *Environ Exp Bot* 54:231–238. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.07.006>.
- Tolrà R, Vogel-Mikuš K, Hajiboland R, Kump P, Pongrac P, Kaulich B, Gianoncelli A, Babin V, Barceló J, Regvar M, Poschenrieder C (2011) Localization of aluminium in tea (*Camellia sinensis*) leaves using low energy X-ray fluorescence spectro-microscopy. *J Plant Res.*, 124(1): 165-72. <https://doi.org/10.1007/s10265-010-0344-3>.
- Tuomisto H, Ruokolainen K, Poulsen A, Moran R, Quintana C, Cañas G, Celi J (2002) Distribution and Diversity of Pteridophytes and Melastomataceae along Edaphic Gradients in Yasuni National Park, Ecuadorian Amazonia. *Biotropica* 34: 516–533. [https://doi.org/10.1646/0006-606\(2002\)034\[0516:DADOPA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1646/0006-606(2002)034[0516:DADOPA]2.0.CO;2).

- Van der Ent A, Kopittke P, Paterson D, Casey L, Nkrumah P (2020) Distribution of aluminium in hydrated leaves of tea (*Camellia sinensis*) using synchrotron- and laboratory-based X-ray fluorescence microscopy, *Metallomics*, 12: 1062–1069. <https://doi.org/10.1039/c9mt00300b>.
- Ventrella M, Almeida A, Nery L, Coelho V (2013) Métodos histoquímicos aplicados às sementes. Ed. UFV, Viçosa.
- Vera-Maldonado P, Aquea F, Reyes-Díaz M, Cárcamo-Fincheira P, Soto-Cerda B, Nunes-Nesi A, Inostroza-Blancheteau C (2024) Role of boron and its interaction with other elements in plants. *Front. Plant Sci.*, 15: 1332459. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1332459>.
- Verbruggen N, Hermans C (2013) Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant Soil*, 368: 87–99. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1589-0>.
- Vieira I, Toledo P, Silva J, Higuchi H (2008) Deforestation and threats to the biodiversity of Amazonia. *Braz. J. Biol.* 68(4): 949-956. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000500004>.
- Xu X, Du X, Wang F, Sha F, Chen Q, Tian G, Zhu Z, Ge S, Jiang Y (2020) Effects of Potassium Levels on Plant Growth, Accumulation and Distribution of Carbon, and Nitrate Metabolism in Apple Dwarf Rootstock Seedlings. *Front. Plant Sci.*, 11: 904. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00904>.
- Yang J, Zhu X, Peng Y, Zheng C, Li G, Liu Y, Shi Y, Zheng S (2011) Cell Wall Hemicellulose Contributes Significantly to Aluminum Adsorption and Root Growth in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 155(4): 1885–1892. <https://doi.org/10.1104/pp.111.172221>.
- Watanabe T, Misawa S, Hiradate S, Osaki M (2008) Characterization of root mucilage from *Melastoma malabathricum*, with emphasis on its roles in aluminum accumulation. *New Phytol.*, 178(3): 581-9. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02397.x>.
- Wege S (2022) Manganese management in plants: Golgi transporter determines manganese allocation and cell wall composition. *Plant Physiol.*, 190(4): 2077-2079. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac429>.
- Wehr J, Blamey F, Hanna J, Kopittke P, Kerven G, Menzies N (2010) Hydrolysis and speciation of Al bound to pectin and plant cell wall material and its reaction with the dye chrome azurol S. *J Agric Food Chem.*, 58(9):5553-60. <https://doi.org/10.1021/jf100201x>.
- Ye C, Huang W, Hall S, Hu S (2022) Association of Organic Carbon With Reactive Iron Oxides Driven by Soil pH at the Global Scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 36: e2021GB007128. <https://doi.org/10.1029/2021GB007128>.
- Zaninetti R, Moreira A, Moraes L (2016) Atributos físicos, químicos e biológicos de Latossolo Amarelo na conversão de floresta primária para seringueiras na Amazônia. *Pesq. Agropec. Bras.* 51, (9): <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900005>.
- Zhang L, Li G, Wang M, Di D, Sun L, Kronzucker H, Shi W (2018) Excess iron stress reduces root tip zone growth through nitric oxide-mediated repression of potassium homeostasis in *Arabidopsis*. *New Phytol.*, 219 (1): 259-274. <https://doi.org/10.1111/nph.15157>.
- Zeng Q, Chen R, Zhao X, Shen R, Noguchi A, Shinmachi F, Hasegawa I (2013) Aluminum could be transported via phloem in *Camellia oleifera* Abel. *Tree Physiol* 33:96–105. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps117>.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Plantas acumuladoras de alumínio fazem parte da vegetação nativa de inúmeras áreas tropicais do globo e crescem bem em solos ácidos. Ao longo do processo evolutivo, essas plantas adquiriram habilidades que as tornaram únicas e diversificadas, integrando a diversidade de grupos botânicos com diferentes estratégias de vida, como constatado no Capítulo I deste trabalho.

As plantas com flores representam os grupos de acumuladores de Al mais bem estudados. Apesar disso, observamos uma carência de informações sobre algumas famílias botânicas. Nosso estudo não apenas reforçou o caráter acumulador de alumínio em famílias já consagradas, mas também destacou a proeminência de outras famílias cuja capacidade de acumulação do metal é pouco conhecida, como no caso das Fabaceae. Além disso, constatamos que, embora existam limitações no conhecimento sobre esses organismos em algumas regiões do território nacional, a qualidade de nossas pesquisas, assim como a representatividade frente aos estudos da área, é destacada.

Por meio do nosso trabalho de campo, fornecemos um dos primeiros insights sobre a acumulação de Al na região amazônica brasileira. Registramos dois novos Al-acumuladores em Melastomataceae, destacando o potencial da família, assim como do gênero *Miconia* na acumulação do metal. Embora limitado a um grupo e englobando poucas espécies, observamos que as espécies amazônicas apresentam estratégias semelhantes às de outros Al-acumuladores de regiões tropicais, principalmente relacionadas à imobilização e ao armazenamento do metal nos tecidos foliares.

As elevadas concentrações de Al detectadas nas folhas de todas as espécies analisadas representam um dado relevante, especialmente quando consideradas as possibilidades de fitoextração desse elemento metálico em solos onde sua forma tóxica é latente. Esta capacidade nos oferece um leque de variadas possibilidades de aplicação tanto em questões agrícolas quanto para recuperação ambiental. Nesse sentido, sugere-se que mais estudos sejam realizados na área, não apenas com a premissa de identificar novos acumuladores, mas também com o objetivo de compreender o grau de importância do alumínio para o desenvolvimento das funções vitais dessas espécies.