

AGROMINERAÇÃO NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DO USO DE PLANTAS NA MINERAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE SOLOS**AGROMINING IN BRAZIL: A SYSTEMATIC REVIEW OF THE USE OF PLANTS IN MINING AND SOIL RECOVERY** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.030-011>**Daniele Gomiero Polli Sartori**

Graduada em Tecnologia em Química Ambiental e Licenciada em Química pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestranda no Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)
E-mail: daniele_gp@hotmail.com

Rodrigo Zancanaro

Mestrando em Geografia pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Área de Concentração: Produção do Espaço e Meio Ambiente. Linha Pesquisa em Dinâmica, Utilização e Preservação do Meio Ambiente
E-mail: rodrigozancanaro36@gmail.com

RESUMO

A agromineração ou fitomineração constitui uma tecnologia emergente que emprega plantas hiperacumuladoras para extrair e concentrar metais presentes no solo, possibilitando simultaneamente a recuperação ambiental e a geração de biomassa metalífera com potencial valor econômico. Este estudo apresenta um mapeamento sistemático quantitativo da produção científica brasileira sobre o tema, abrangendo artigos publicados entre 2012 e 2025. Foram identificados 14 estudos que investigam solos naturais e áreas antropicamente contaminadas, com destaque para ambientes ultramáficos, máfico-ultramáficos e ferruginosos, onde se observa maior diversidade de espécies metalófitas. Os resultados indicam avanços expressivos na identificação de espécies hiperacumuladoras de níquel (Ni), elementos de terras raras (ETR), zinco (Zn) e alumínio (Al), além da ampla ocorrência de espécies acumuladoras e fitostabilizadoras. Verificou-se também um crescimento acentuado das pesquisas a partir de 2021, especialmente aquelas voltadas à fitomineração e à produção de bio-minério. No entanto, persistem lacunas relacionadas à produtividade das espécies, ao escalonamento das operações em campo e à viabilidade econômica da técnica. Conclui-se que a agromineração representa uma estratégia sustentável de extração e recuperação de metais, capaz de integrar produção metalífera e restauração ecológica. Sua consolidação, entretanto, depende do avanço conjunto de estudos ecológicos, fisiológicos e de desenvolvimento tecnológico.

Palavras-chave: Fitomineração; Fitoextração; Plantas hiperacumuladoras; Metalófitas; Bio-minério; Acúmulo de metais em plantas.

ABSTRACT

Agromining or phytomining is an emerging technology that employs hyperaccumulator plants to extract and concentrate metals present in the soil, simultaneously enabling environmental recovery and the generation of metalliferous biomass with potential economic value. This study presents a systematic quantitative mapping of Brazilian scientific production on the subject, encompassing articles published between 2012 and 2025. Fourteen studies were identified that investigate natural soils and anthropogenically contaminated areas, with emphasis on ultramafic, mafic-ultramafic, and ferruginous



environments, where a greater diversity of metallophytic species is observed. The results indicate significant advances in the identification of hyperaccumulator species of nickel (Ni), rare earth elements (REEs), zinc (Zn), and aluminum (Al), in addition to the wide occurrence of accumulator and phytostabilizing species. A marked increase in research was also observed from 2021 onwards, especially those focused on phytomining and bio-ore production. However, gaps remain regarding species productivity, the scaling of field operations, and the economic viability of the technique. It is concluded that agromining represents a sustainable strategy for metal extraction and recovery, capable of integrating metal production and ecological restoration. Its consolidation, however, depends on the joint advancement of ecological, physiological, and technological development studies.

Keywords: Phytomining; Phytoextraction; Hyperaccumulator plants; Metallophytes; Bio-ore; Metal accumulation in plants.



1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades econômicas mais antigas e relevantes do Brasil, desempenhando papel estratégico no desenvolvimento industrial e na geração de divisas (Alves; Ferreira; Araújo, 2021). No entanto, a intensa exploração mineral tem provocado graves impactos ambientais em diferentes escalas. Globalmente, a extração de metais contribui para a degradação de solos, a contaminação de corpos hídricos e a perda de biodiversidade (Giljum et al., 2025), enquanto no contexto brasileiro o manejo inadequado de rejeitos, sedimentos e detritos evidencia riscos adicionais à cobertura vegetal, à qualidade do solo e à integridade de ecossistemas megadiversos (Carmo et al., 2020). Esses efeitos comprometem a capacidade de regeneração natural dos ecossistemas, exigindo a adoção de estratégias sustentáveis para mitigação e recuperação ambiental (Pereira Júnior et al., 2022).

Nesse cenário, emergem as fitotecnologias, estratégias baseadas no uso de plantas para remediar, estabilizar ou recuperar ambientes degradados, combinando eficiência ambiental e potencial socioeconômico (Kikis et al., 2024; Cao et al., 2025). Entre essas abordagens, a agromineração, também denominada fitomineração, destaca-se por utilizar plantas hiperacumuladoras capazes de extrair metais do solo e concentrá-los em seus tecidos, permitindo não apenas a recuperação de áreas contaminadas, mas também a exploração de metais de interesse econômico a partir da biomassa vegetal (Kikis et al., 2024; Cao et al., 2025). Essa integração de remediação ambiental e valorização de recursos representa uma solução sustentável para solos degradados, evidenciando o potencial das fitotecnologias como ferramenta de manejo ambiental e desenvolvimento econômico.

Estudos internacionais demonstram o potencial da agromineração para a extração de metais como níquel (Ni), zinco (Zn), cobalto (Co) e manganês (Mn), especialmente em áreas tropicais (Van Der Ent et al., 2021). No Brasil, pesquisas recentes têm identificado solos ultramáficos e espécies nativas com capacidade hiperacumuladora, o que abre novas possibilidades para o uso dessa tecnologia em programas de restauração ecológica e mineração sustentável (Nascimento et al., 2022). Entretanto, o conhecimento ainda é fragmentado e concentrado em poucas regiões e grupos taxonômicos, evidenciando a necessidade de sistematização e análise crítica da literatura existente.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo realizar um mapeamento sistemático quantitativo da literatura, a fim de identificar avanços, lacunas e tendências relacionadas à agromineração no Brasil. A análise concentra-se no uso de plantas hiperacumuladoras e espécies acumuladoras em solos naturais e antropicamente contaminados, destacando seu potencial na recuperação ambiental e no desenvolvimento de tecnologias emergentes de fitomineração. Ao organizar e sintetizar a produção científica nacional sobre o tema, este trabalho busca consolidar o estado da arte e contribuir para o aprimoramento do debate técnico-científico sobre estratégias sustentáveis de manejo e aproveitamento de metais em ambientes degradados (Nascimento et al., 2022; Kikis et al., 2024; Cao et al., 2025).



2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ESTRATÉGIA DE BUSCA

O levantamento bibliográfico foi realizado em novembro de 2025 nas bases SciELO, Scopus, ScienceDirect e Web of Science¹, acessadas via Portal de Periódicos CAPES. As buscas foram realizadas em inglês e restritas aos campos *título*, *resumo* e *palavras-chave*. Após testes exploratórios, definiu-se a seguinte *string* final²: (agromining OR phytomining OR phytoextraction) AND (hyperaccumula* OR metallophyt* OR bioore* OR "bio-ore*" OR "metal accumulator*") AND Brazil*

Essa combinação de descritores, operadores booleanos e truncamentos buscou abranger estudos sobre agromineração, hiperacumuladoras e processos de fitoextração em contexto brasileiro.

2.2 SELEÇÃO DOS ESTUDOS

Os registros recuperados foram exportados e integrados no EndNote³. A seleção ocorreu em três etapas:

- (i) remoção de duplicidades;
- (ii) triagem por título e resumo;
- (iii) leitura integral para aplicação dos critérios de elegibilidade.

Critérios de inclusão:

- (a) estudos empíricos envolvendo solo, plantas e metais;
- (b) pesquisas realizadas total ou parcialmente no Brasil;
- (c) artigos originais de periódicos científicos.

Critérios de exclusão:

- (a) revisões e estudos teóricos;
- (b) pesquisas conduzidas inteiramente fora do Brasil;
- (c) artigos sem texto completo disponível.

2.3 EXTRAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Para cada artigo selecionado, foram extraídas informações referentes a: ano de publicação, local do estudo, tipo de solo ou geologia, origem dos metais (natural ou antropogênica), metais analisados, espécies

¹ Essas plataformas foram escolhidas por sua ampla cobertura de publicações científicas nacionais e internacionais, garantindo representatividade e diversidade temática.

² Nas bases ScienceDirect e SciELO, que não permitem o uso do operador truncador (*), empregou-se a seguinte *string* de busca completa: (agromining OR phytomining OR phytoextraction) AND (hyperaccumulator OR metallophyte OR bioore OR "bio-ore" OR "metal accumulator") AND Brazil.

³ EndNote Online é a versão em nuvem do gerenciador de referências EndNote (Clarivate Analytics). A ferramenta permite importar, armazenar e organizar registros bibliográficos de diferentes bases, bem como identificar duplicidades e gerar bibliografias padronizadas.



vegetais, família botânica, função ecológica ou tecnológica (fitoextração, fitostabilização, rizofiltração), concentrações metálicas e finalidade do estudo (fitorremediação, fitomineração, identificação de espécies hiperacumuladoras). Os dados foram organizados em planilha estruturada para padronização das categorias.

2.4 ANÁLISE DOS DADOS

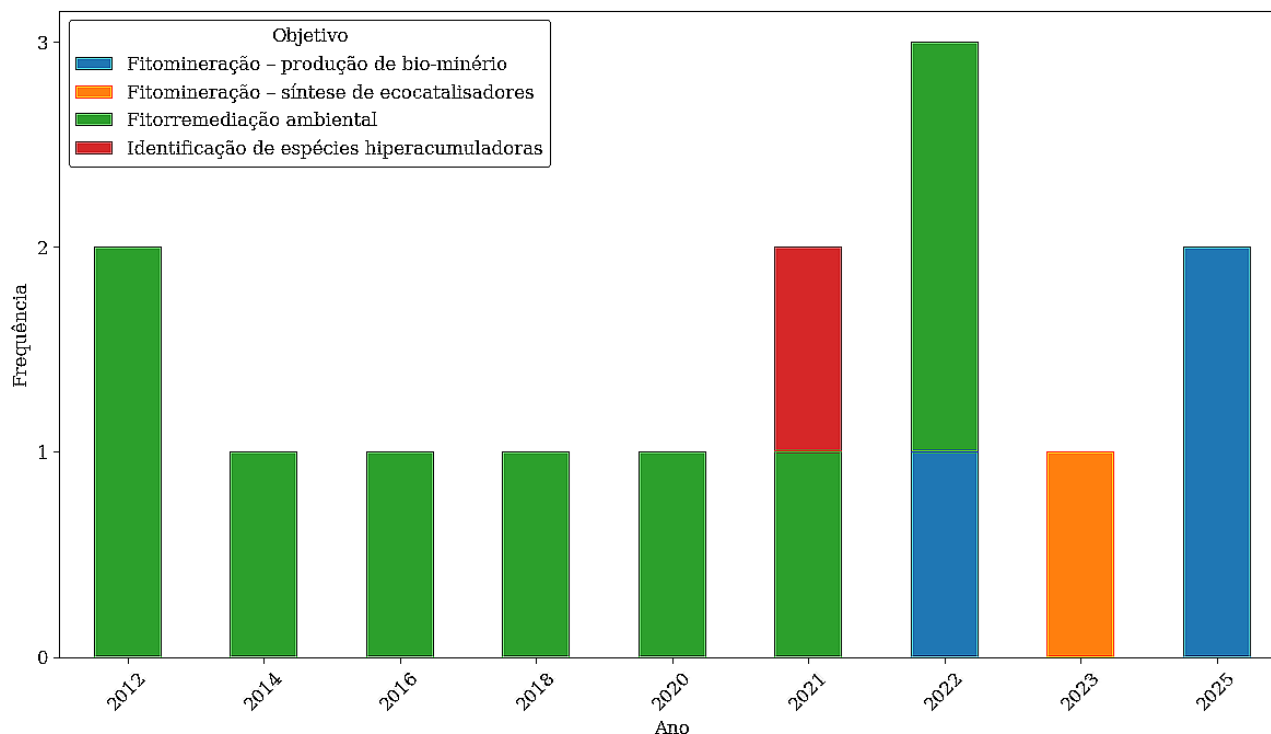
Os dados foram analisados por estatística descritiva não-meta-analítica e categorização temática. Os padrões identificados foram sintetizados por meio de gráficos, tabelas e matrizes de organização, buscando identificar tendências, lacunas e relações entre metais, espécies e contextos ambientais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PANORAMA DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA E DISTRIBUIÇÃO DOS ESTUDOS

A busca sistemática identificou inicialmente 34 artigos, dos quais 14 atenderam aos critérios de inclusão e não se enquadraram nos critérios de exclusão, compondo a amostra final analisada. Esses estudos, publicados entre 2012 e 2025, abrangem diferentes tipos de solo, contextos ambientais e objetivos de pesquisa. A Figura 1 evidencia o padrão temporal da produção científica, mostrando que os estudos iniciais, entre 2012 e 2020, concentram-se na fitorremediação ambiental, sobretudo em áreas contaminadas por metais decorrentes de atividades minerárias e industriais. Somente a partir de 2021 observa-se uma ampliação das finalidades, com a inclusão de pesquisas dedicadas à identificação de espécies vegetais hiperacumuladoras e ao desenvolvimento experimental da fitomineração. Esse avanço é coerente com o cenário internacional, no qual a mineração vegetal passa a ser considerada uma estratégia complementar para o aproveitamento de metais de interesse econômico (Kikis et al., 2024).

Figura 1. Distribuição temporal dos estudos por objetivo principal



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Tabela 1 sintetiza a distribuição espacial dos estudos, evidenciando forte relação entre geologia local e ocorrência de espécies metalófitas. Ambientes ultramáficos e máfico-ultramáficos, como Niquelândia (GO), Poços de Caldas (MG) e áreas serpentinizadas do Nordeste, destacam-se por apresentarem elevadas concentrações naturais de Ni, Mg, Co e Fe, favorecendo o surgimento de hiperacumuladoras. Ambientes ferruginosos, como as cangas do Quadrilátero Ferrífero, apresentam predomínio de Fe, Mn e Al, refletindo padrões típicos de ecossistemas rupestres. Por outro lado, estudos conduzidos em áreas antropicamente contaminadas dão ênfase a metais como Cu, Pb, As e Zn, cuja mobilidade e toxicidade estão mais associadas às atividades humanas do que ao substrato geológico.

Essa diversidade de contextos ambientais influencia diretamente os objetivos e técnicas empregadas. Entre as principais abordagens identificadas, destaca-se a fitoextração, estratégia em que as plantas absorvem metais do solo e os translocam para seus tecidos aéreos, permitindo a posterior remoção da biomassa contaminada. Já a fitostabilização consiste na imobilização dos metais no solo por meio das raízes, onde esses elementos permanecem retidos ou precipitados na rizosfera, reduzindo sua biodisponibilidade e mobilidade, sem necessariamente removê-los do ambiente. A fitoextração permanece como a abordagem dominante nos estudos analisados, embora a fitostabilização seja mais recorrente em solos antropicamente contaminados. A fitoextração assistida aparece em menor número, mas sugere um esforço crescente para aumentar o desempenho de espécies não hiperacumuladoras por meio da aplicação de insumos externos.

Tabela 1. Caracterização dos estudos incluídos na revisão sistemática sobre agromineração no Brasil (2012–2025)

Nº	Autor(es)	Ano	Local	Tipo(s) de Solo / Geologia	Origem do(s) metal(is) no ambiente	Principais metal(is) analisado(s)	Espécie(s) potenciais	Papel ecológico / funcional	Objetivo principal
1	Abreu, C. A. et al.	2012	Piracicaba; Campinas — SP	Latossolo	Antropogênica – Industrial	B	<i>Ricinus communis</i>	Fitoextração assistida	Fitorremediação ambiental
2	Afonso, T. F. et al.	2020	Caçapava do Sul — RS	Chernossolo	Antropogênica – Mineração	Cu, Pb	<i>Baccharis dracunculifolia</i> , <i>Baccharis trimera</i> , <i>Equisetum giganteum</i> , <i>Eryngium horridum</i> , <i>Oenothera sp.</i> , <i>Plantago tomentosa</i> , <i>Rostraria cristata</i> , <i>Solanum viarum</i>	Fitoextração e fitostabilização	Fitorremediação ambiental
3	Alponti, L. H. R. et al.	2023	Região Amazônica brasileira — PA	Não informado	Antropogênica – Mineração	Cu, Fe	<i>Pluchea sagittalis</i>	Fitoextração	Fitomineração – síntese de ecocatalisadores
4	Ashraf, N. et al.	2022	Poços de Caldas — MG	Latossolo / Neossolo Litólico (depósito mineral rico em ETR ⁴)	Natural	Ce, La, Nd, Pr, Sm	<i>Christella dentata</i>	Fitoextração	Fitomineração – produção de bio-minério (bio-ore)
5	Belloeil, C. et al.	2021	Região Neotropical (Brasil)	Neossolo Litólico (ultramafítico)	Natural	Mn, Zn	<i>Casearia brasiliensis</i> , <i>Casearia grandiflora</i> , <i>Psychotria trichoneura</i> , <i>Rinorea longistipulata</i> , <i>Rinorea multivenosa</i> , <i>Rinorea paniculata</i> , <i>Roupala adiantifolia</i> , <i>Roupala meisneri</i> , <i>Roupala rhombifolia</i>	Fitoextração	Identificação de espécies hiperacumuladoras de metais
6	Boechat, C. L. et al.	2016	Lavras do Sul; — RS	Neossolo Litólico	Antropogênica – Mineração	Ba, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	<i>Baccharis trimera</i> , <i>Cyperus eragrostis</i> , <i>Dicranopteris nervosa</i> , <i>Eryngium horridum</i> , <i>Hyptis brevipes</i> , <i>Senecio brasiliensis</i> , <i>Senecio leptolobus</i>	Fitoextração e fitostabilização	Fitorremediação ambiental

⁴ Elementos de Terras Raras.



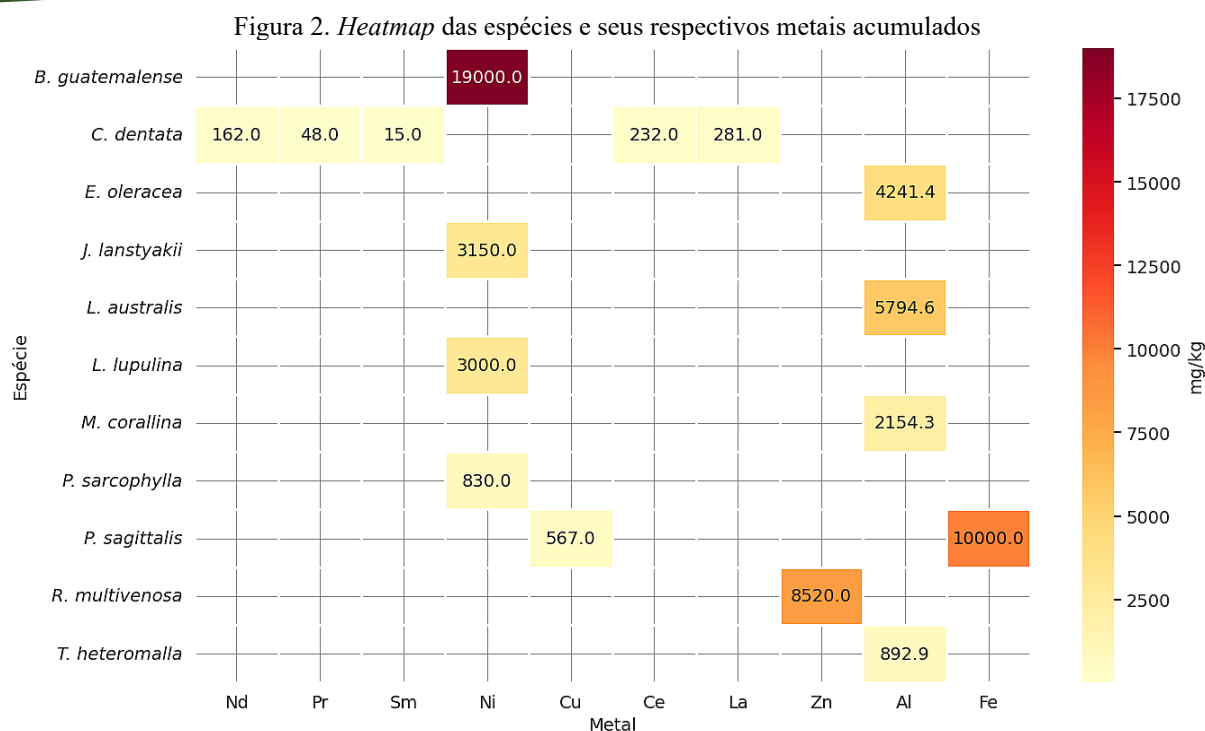
Nº	Autor(es)	Ano	Local	Tipo(s) de Solo / Geologia	Origem do(s) metal(is) no ambiente	Principais metal(is) analisado(s)	Espécie(s) potenciais	Papel ecológico / funcional	Objetivo principal
7	Ferreira, A. D. et al.	2021	São Mateus — ES	Argissolo	Antropogênica – Diversas	As	<i>Eleocharis acutangula</i> , <i>Typha domingensis</i>	Fitoextração, fitostabilização e rizofiltração	Fitorremediação ambiental
8	Lima, L. H. V. et al.	2025	Buenos Aires — PE	Neossolo Litólico (harzburgito serpentinizado)	Natural	Ni	<i>Blepharidium guatemalense</i>	Fitoextração	Fitomineração - produção de bio-minério (bio-ore)
9	Lima, L. H. V. et al.	2025	Niquelândia — GO	Neossolo Litólico / Cambissolo (máfico-ultramáfico)	Natural	Co, Mg, Ni	<i>Justicia lanstyakii</i> , <i>Lippia lupulina</i> , <i>Pfaffia sarcophylla</i>	Fitoextração e fitoextração assistida	Fitomineração - produção de bio-minério (bio-ore)
10	Melo, E. E. C. et al.	2012	Itutinga; Lavras — MG	Neossolo + Latossolo	Natural e Antropogênica – Diversas	As	<i>Helianthus annuus</i> , <i>Ricinus communis</i>	Fitoextração assistida	Fitorremediação ambiental
11	Nascimento, S. S. et al.	2014	Diamantina — MG	Latossolo	Antropogênica – Diversas	Pb	<i>Brachiaria decumbens</i> (cultivar Basilisk)	Fitoextração e fitostabilização	Fitorremediação ambiental
12	Oliveira, D. P. et al.	2022	Viçosa do Ceará — CE	Não informado	Antropogênica – Mineração	Cu	<i>Bauhinia unguolata</i> , <i>Combretum aff. pisonioides</i> , <i>Combretum leprosum</i> , <i>Croton blanchetianus</i> , <i>Hymenaea courbaril</i>	Fitostabilização	Fitorremediação ambiental

Nº	Autor(es)	Ano	Local	Tipo(s) de Solo / Geologia	Origem do(s) metal(is) no ambiente	Principais metal(is) analisado(s)	Espécie(s) potenciais	Papel ecológico / funcional	Objetivo principal
13	Schettini, A. T. et al.	2018	Ouro Preto — MG	Neossolo Litólico férrico / Cambissolo férrico (canga / itabirito)	Natural e Antropogênica — Mineração	Al, Fe, Mn	<i>Baccharis reticularia</i> , <i>Byrsonima variabilis</i> , <i>Dalbergia villosa</i> , <i>Diplusodon microphyllus</i> , <i>Dyckia rariflora</i> , <i>Eremanthus erythropappus</i> , <i>Eremanthus incanus</i> , <i>Erythroxylum gonocladum</i> , <i>Heteropterys campestris</i> , <i>Lantana fucata</i> , <i>Leandra australis</i> , <i>Matayba marginata</i> , <i>Miconia corallina</i> , <i>Myrcia splendens</i> , <i>Ouratea semiserrata</i> , <i>Periandra mediterranea</i> , <i>Senna reniformis</i> , <i>Sporobolus metallicus</i> , <i>Tibouchina heteromalla</i>	Fitoextração e fitostabilização	Fitorremediação ambiental
14	Souza, N. D. et al.	2022	Seropédica; Paraty — RJ	Não informado	Antropogênica — Diversas	Al, Fe	<i>Euterpe oleracea</i>	Fitoextração e fitoextração assistida	Fitorremediação ambiental

Fonte: Dados da pesquisa (2025). Elaborada pelos autores (2025).

3.2 PADRÕES DE ACÚMULO E ESPÉCIES HIPERACUMULADORAS

A Tabela 1 registra uma variedade de metais investigados, mas a Figura 2 destaca apenas aqueles efetivamente acumulados em níveis relevantes pelas espécies consideradas. Os elementos representados no eixo x (Nd, Pr, Sm, Ni, Cu, Ce, La, Zn, Al e Fe) correspondem aos metais para os quais foram observadas concentrações expressivas nos tecidos das partes aéreas das plantas. Em contraste, elementos como Co, Pb, As e Cd foram avaliados em alguns estudos, mas não aparecem na Figura 2, indicando que as espécies testadas não acumularam esses metais em níveis compatíveis com os critérios de hiperacumulação.



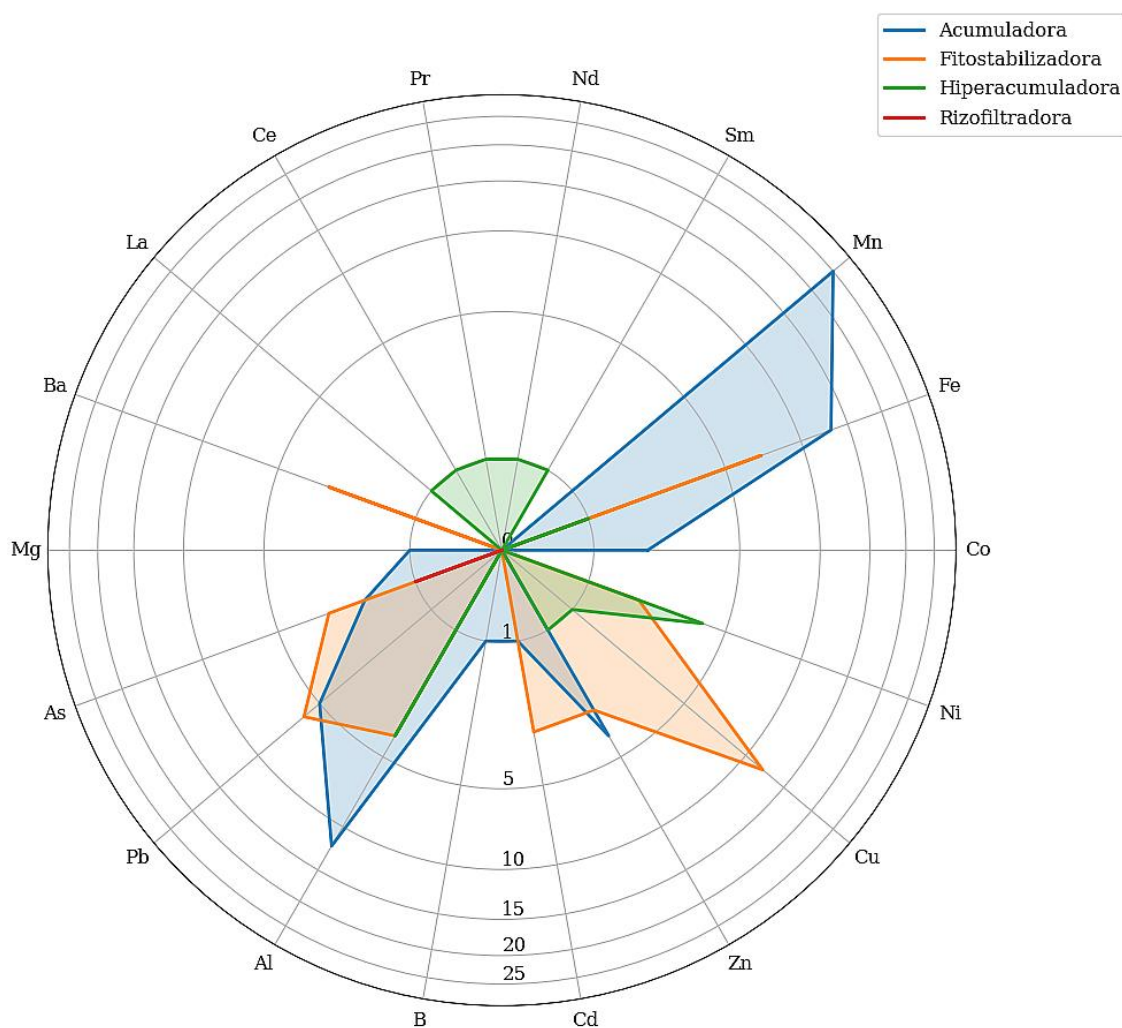
Os resultados revelam espécies particularmente relevantes para a fitominação no Brasil. *Blepharidium guatemalense* apresentou aproximadamente 19.000 mg/kg de Ni, o maior valor entre as espécies avaliadas. *Justicia lanstykii*, *Lippia lupulina* e *Pfaffia sarcophylla* também exibiram elevadas concentrações de Ni, confirmando o potencial metalófito das comunidades vegetais de ambientes ultramáficos. *Christella dentata* destacou-se pelo acúmulo de elementos de terras raras leves, enquanto espécies de ambientes ferruginosos, como *Leandra australis*, *Miconia corallina*, *Rinorea multivenosa*, *Euterpe oleracea* e *Pluchea sagittalis*, evidenciaram capacidade de acumular Fe, Al ou Zn.

Esse conjunto mostra que, embora a hiperacumulação seja um fenômeno raro, ela é particularmente marcante em ambientes específicos, contribuindo tanto para o avanço do conhecimento ecológico quanto para o desenvolvimento de tecnologias emergentes, como a fitominação de Ni e elementos de terras raras.

3.3 DIVERSIDADE FUNCIONAL DE ESPÉCIES E APLICAÇÕES POTENCIAIS

Além das hiperacumuladoras, a base de dados compilada reúne um conjunto expressivo de espécies que desempenham outras funções fitotecnológicas relevantes. Foram identificadas 66 espécies classificadas como acumuladoras, 43 como fitostabilizadoras e uma espécie com função rizofiltradora. A Figura 3 apresenta a distribuição dos registros por metal e categoria funcional, permitindo visualizar diferenças na amplitude de resposta entre os grupos.

Figura 3. Distribuição dos metais associados às espécies classificadas como acumuladoras, fitostabilizadoras, hiperacumuladoras e rizofiltradoras⁵



Os padrões revelam que espécies acumuladoras e fitostabilizadoras apresentam um espectro metalífero muito mais amplo do que as hiperacumuladoras, com destaque para Mn, Fe, Al, Zn, Cd, Cu e As. Essa diversidade indica a presença de múltiplas estratégias fisiológicas, que variam desde a retenção radicular e a estabilização no solo até formas moderadas de acúmulo. A relativa escassez de registros de rizofiltração sugere que essa técnica permanece subexplorada no contexto brasileiro.

Esses resultados reforçam que estratégias de fitorremediação e fitomineração podem se beneficiar da complementaridade entre diferentes grupos funcionais. A maior parte da flora não apresenta hiperacumulação, mas desempenha papéis essenciais para a retenção, imobilização ou absorção parcial de metais, ampliando o espectro de aplicações potenciais das fitotecnologias no país. A relação completa das espécies, famílias botânicas, respectivos metais e concentrações encontra-se apresentada no Anexo A.

⁵ Gráfico radial em escala logarítmica, para melhor visualização das diferenças entre metais.



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente mapeamento sistemático quantitativo evidencia que o Brasil possui elevada diversidade vegetal com potencial para uso em fitotecnologias aplicadas ao manejo e ao aproveitamento de metais. Embora o número de espécies hiperacumuladoras registradas ainda seja limitado, sua ocorrência em ambientes ultramáficos e ferruginosos confirma a presença de adaptações fisiológicas únicas, relevantes tanto do ponto de vista ecológico quanto tecnológico. Por outro lado, a expressiva quantidade de espécies acumuladoras e fitostabilizadoras demonstra que a flora brasileira oferece múltiplos caminhos para a implementação de estratégias de fitorremediação e fitomineração.

A análise temporal aponta que a fitomineração é uma área emergente no país, com estudos concentrados a partir de 2021. Contudo, permanecem lacunas importantes, especialmente no que se refere à produtividade vegetal, estimativas de extração em escala de campo, eficiência econômica do bio-minério e padronização dos critérios de hiperacumulação. O avanço dessas frentes é essencial para consolidar a mineração vegetal como uma alternativa viável em cenários de baixa concentração mineral ou em áreas degradadas pela mineração convencional.

Os resultados reforçam que o desenvolvimento da agromineração no Brasil depende da integração entre estudos ecológicos, fisiológicos e tecnológicos, capazes de conectar o potencial natural da flora metalófitas à inovação em manejo sustentável dos recursos minerais. A ampliação de pesquisas experimentais, aliada à caracterização detalhada de espécies nativas, representa um caminho promissor para o avanço da área e para a aplicação prática dessas técnicas em ambientes naturais e antropizados.



REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A. et al. Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 123, p. 3–7, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.04.013>. Acesso em: 09 nov. 2025.
- AFONSO, T. F. et al. Bioprospection of indigenous flora grown in copper mining tailing area for phytoremediation of metals. *Journal of Environmental Management*, v. 256, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109953>. Acesso em: 03 nov. 2025.
- ALPONTI, L. H. R. et al. Multicomponent reactions promoted by ecocatalyst from metal hyperaccumulating plant *Pluchea sagittalis*. *Reactions*, v. 4, n. 4, p. 552–568, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/reactions4040033>. Acesso em: 05 nov. 2025.
- ALVES, W. et al. Challenges and pathways for Brazilian mining sustainability. *Resources Policy*, v. 74, art. 101648, 2021. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101648. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101648>. Acesso em: 31 out. 2025.
- ASHRAF, N. et al. Identification of potential plant species hyperaccumulating light rare earth elements (LREE) in a mining area in Minas Gerais, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 60, p. 90779–90790, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22009-9>. Acesso em: 04 nov. 2025.
- BELLOEIL, C. et al. The X-ray fluorescence screening of multiple elements in herbarium specimens from the Neotropical region reveals new records of metal accumulation in plants. *Metallomics*, v. 13, n. 8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfab045>. Acesso em: 06 nov. 2025.
- BOECHAT, C. L. et al. Accumulation and translocation of heavy metal by spontaneous plants growing on multi-metal-contaminated site in the Southeast of Rio Grande do Sul state, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, n. 3, p. 2371–2380, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5342-5>. Acesso em: 02 nov. 2025.
- CAO, X. et al. Enhanced Phytoextraction Technologies for the Sustainable Remediation of Cadmium-Contaminated Soil Based on Hyperaccumulators — A Review. *Plants*, v. 14, n. 1, art. 115, 2025. DOI: 10.3390/plants14010115. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants14010115>. Acesso em: 31 out. 2025.
- CARMO, F. F. et al. Environmental risks of mining waste in megadiverse regions in Brazil. *Sustainability*, v. 12, n. 20, art. 8466, 2020. DOI: 10.3390/su12208466. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12208466>. Acesso em: 31 out. 2025.
- FERREIRA, A. D. et al. Arsenic phytoremediation in contaminated and flooded soil: accumulation and translocation in two macrophytes. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 232, n. 7, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05257-2>. Acesso em: 01 nov. 2025.
- GILJUM, S. et al. Metal mining is a global driver of environmental change. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 6, n. 7, p. 441–455, 2025. DOI: 10.1038/s43017-025-00683-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00683-w>. Acesso em: 31 out. 2025.



KIKIS, C. et al. Soil Phytomining: Recent Developments — A Review. *Soil Systems*, v. 8, n. 1, art. 8, 2024. DOI: 10.3390/soilsystems8010008. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010008>. Acesso em: 31 out. 2025.

LIMA, L. H. V. et al. Foliar elemental distribution in *Blepharidium guatemalense* assessed by synchrotron X-ray fluorescence spectroscopy and colorimetric optical microscopy. *International Journal of Phytoremediation*, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15226514.2025.2579145>. Acesso em: 04 nov. 2025.

LIMA, L. H. V. et al. Metal concentration and leaf spatial distribution assessed by synchrotron μ XRF in Brazilian nickel hyperaccumulators. *Plant and Soil*, v. 514, n. 1, p. 1461–1472, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07477-5>. Acesso em: 08 nov. 2025.

MELO, E. E. C. et al. Availability and accumulation of arsenic in oilseeds grown in contaminated soils. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 223, n. 1, p. 233–240, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0853-2>. Acesso em: 01 nov. 2025.

NASCIMENTO, C. W. A. et al. Ultramafic soils and nickel phytomining opportunities: A review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, e0210099, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210099>. Acesso em: 31 out. 2025.

NASCIMENTO, S. S. et al. Availability and accumulation of lead for forage grasses in contaminated soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 14, n. 4, p. 783–802, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4067/S0718-95162014005000063>. Acesso em: 06 nov. 2025.

OLIVEIRA, D. P. et al. Cu dynamics in the rhizosphere of native tropical species: assessing the potential for phytostabilization in mining-impacted soils. *Minerals*, v. 12, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min12020130>. Acesso em: 07 nov. 2025.

PEREIRA JÚNIOR, A. et al. Systematic review on the reclamation of areas degraded by mining. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 8, p. e2711830706, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30706>. Acesso em: 31 out. 2025.

SCHETTINI, A. T. et al. Exploring Al, Mn and Fe phytoextraction in 27 ferruginous rocky outcrops plant species. *Flora*, v. 238, p. 175–182, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.05.004>. Acesso em: 02 nov. 2025.

SOUZA, N. D. et al. A Brazilian Amazon species with high potential to phytoextract potential toxic elements. *Floresta e Ambiente*, v. 29, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0076>. Acesso em: 03 nov. 2025.

VAN DER ENT, A. et al. Isotopic signatures reveal zinc cycling in the natural habitat of hyperaccumulator *Dichapetalum gelonioides* subspecies from Malaysian Borneo. *BMC Plant Biology*, v. 21, art. 437, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03190-4>. Acesso em: 31 out. 2025.



ANEXO A

Item	Espécie	Família Botânica	Metal	Categoria	Concentração de metal (mg/kg) ⁶
1	<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae	B	Acumuladora	626
2	<i>Baccharis dracunculifolia</i>	Asteraceae	Pb	Acumuladora	3
3	<i>Baccharis trimera</i>	Asteraceae	Pb	Acumuladora	4
4	<i>Rostraria cristata</i>	Poaceae	Pb	Acumuladora	2,1
5	<i>Roupala adiantifolia</i>	Proteaceae	Mn	Acumuladora	5930
6	<i>Roupala meisneri</i>	Proteaceae	Mn	Acumuladora	5360
7	<i>Roupala rhombifolia</i>	Proteaceae	Mn	Acumuladora	6340
8	<i>Casearia brasiliensis</i>	Salicaceae	Mn	Acumuladora	3350
9	<i>Casearia grandiflora</i>	Salicaceae	Mn	Acumuladora	3350
10	<i>Psychotria trichoneura</i>	Rubiaceae	Mn	Acumuladora	4000
11	<i>Rinorea longistipulata</i>	Violaceae	Zn	Acumuladora	1060
12	<i>Rinorea paniculata</i>	Violaceae	Zn	Acumuladora	56
13	<i>Senecio brasiliensis</i>	Asteraceae	Pb	Acumuladora	72,3
14	<i>Senecio leptolobus</i>	Asteraceae	Zn	Acumuladora	217
15	<i>Senecio leptolobus</i>	Asteraceae	Pb	Acumuladora	83,1
16	<i>Baccharis trimera</i>	Asteraceae	Zn	Acumuladora	276,8
17	<i>Baccharis trimera</i>	Asteraceae	Cd	Acumuladora	2,1
18	<i>Typha domingensis</i>	Typhaceae	As	Acumuladora	400
19	<i>Eleocharis acutangula</i>	Cyperaceae	As	Acumuladora	100
20	<i>Pfaffia sarcophylla</i>	Amaranthaceae	Mg	Acumuladora	25000
21	<i>Pfaffia sarcophylla</i>	Amaranthaceae	Co	Acumuladora	20
22	<i>Justicia lanstyakii</i>	Acanthaceae	Co	Acumuladora	2
23	<i>Leandra australis</i>	Melastomataceae	Fe	Acumuladora	5794,6
24	<i>Leandra australis</i>	Melastomataceae	Mn	Acumuladora	1474,6
25	<i>Miconia corallina</i>	Melastomataceae	Fe	Acumuladora	2154,3
26	<i>Miconia corallina</i>	Melastomataceae	Mn	Acumuladora	661,3
27	<i>Tibouchina heteromalla</i>	Melastomataceae	Fe	Acumuladora	892,9
28	<i>Tibouchina heteromalla</i>	Melastomataceae	Mn	Acumuladora	1017,9
29	<i>Myrcia splendens</i>	Myrtaceae	Al	Acumuladora	144
30	<i>Myrcia splendens</i>	Myrtaceae	Mn	Acumuladora	352,7
31	<i>Diplusodon microphyllus</i>	Lythraceae	Al	Acumuladora	146
32	<i>Diplusodon microphyllus</i>	Lythraceae	Mn	Acumuladora	385,2
33	<i>Heteropterys campestris</i>	Malpighiaceae	Al	Acumuladora	244,3
34	<i>Heteropterys campestris</i>	Malpighiaceae	Fe	Acumuladora	244,3
35	<i>Heteropterys campestris</i>	Malpighiaceae	Mn	Acumuladora	1250,7
36	<i>Baccharis reticularia</i>	Asteraceae	Al	Acumuladora	143,3
37	<i>Baccharis reticularia</i>	Asteraceae	Fe	Acumuladora	143,3
38	<i>Baccharis reticularia</i>	Asteraceae	Mn	Acumuladora	1606,4
39	<i>Eremanthus erythropappus</i>	Asteraceae	Al	Acumuladora	212,1
40	<i>Eremanthus erythropappus</i>	Asteraceae	Fe	Acumuladora	212,1
41	<i>Eremanthus erythropappus</i>	Asteraceae	Mn	Acumuladora	835,9
42	<i>Dyckia rariflora</i>	Bromeliaceae	Al	Acumuladora	113
43	<i>Dyckia rariflora</i>	Bromeliaceae	Fe	Acumuladora	113
44	<i>Dyckia rariflora</i>	Bromeliaceae	Mn	Acumuladora	1929,4
45	<i>Dalbergia villosa</i>	Fabaceae	Al	Acumuladora	148,9

⁶ As concentrações referentes às espécies vegetais classificadas como acumuladoras e hiperacumuladoras correspondem aos teores de metais determinados nas partes aéreas (*shoots*). Para as espécies fitostabilizadoras e rizofiltradoras, os valores referem-se às concentrações nas raízes (*roots*). Concentrações marcadas com (*) indicam valores obtidos especificamente de folhas.



Item	Espécie	Família Botânica	Metal	Categoria	Concentração de metal (mg/kg) ⁶
46	<i>Dalbergia villosa</i>	Fabaceae	Mn	Acumuladora	1438,3
47	<i>Senna reniformis</i>	Fabaceae	Mn	Acumuladora	854,2
48	<i>Byrsonima variabilis</i>	Malpighiaceae	Mn	Acumuladora	360,6
49	<i>Erythroxylum gonocladum</i>	Erythroxylaceae	Al	Acumuladora	80,2
50	<i>Erythroxylum gonocladum</i>	Erythroxylaceae	Mn	Acumuladora	428,4
51	<i>Ouratea semiserrata</i>	Ochnaceae	Mn	Acumuladora	1378,7
52	<i>Periandra mediterranea</i>	Fabaceae	Fe	Acumuladora	46,6
53	<i>Periandra mediterranea</i>	Fabaceae	Mn	Acumuladora	570,6
54	<i>Eremanthus incanus</i>	Asteraceae	Al	Acumuladora	73,6
55	<i>Eremanthus incanus</i>	Asteraceae	Fe	Acumuladora	73,6
56	<i>Eremanthus incanus</i>	Asteraceae	Mn	Acumuladora	1240,7
57	<i>Matayba marginata</i>	Sapindaceae	Al	Acumuladora	375
58	<i>Matayba marginata</i>	Sapindaceae	Fe	Acumuladora	375
59	<i>Matayba marginata</i>	Sapindaceae	Mn	Acumuladora	435,9
60	<i>Lantana fucata</i>	Verbenaceae	Al	Acumuladora	214,4
61	<i>Lantana fucata</i>	Verbenaceae	Fe	Acumuladora	214,4
62	<i>Lantana fucata</i>	Verbenaceae	Mn	Acumuladora	1758,5
63	<i>Sporobolus metallicolus</i>	Poaceae	Al	Acumuladora	340,7
64	<i>Sporobolus metallicolus</i>	Poaceae	Fe	Acumuladora	340,7
65	<i>Sporobolus metallicolus</i>	Poaceae	Mn	Acumuladora	331,9
66	<i>Euterpe oleracea</i>	Arecaceae	Fe	Acumuladora	800
67	<i>Pluchea sagittalis</i>	Asteraceae	Cu	Hiperacumuladora	567
68	<i>Pluchea sagittalis</i>	Asteraceae	Fe	Hiperacumuladora	10000
69	<i>Christella dentata</i>	Thelypteridaceae	La	Hiperacumuladora	281
70	<i>Christella dentata</i>	Thelypteridaceae	Ce	Hiperacumuladora	232
71	<i>Christella dentata</i>	Thelypteridaceae	Pr	Hiperacumuladora	48
72	<i>Christella dentata</i>	Thelypteridaceae	Nd	Hiperacumuladora	162
73	<i>Christella dentata</i>	Thelypteridaceae	Sm	Hiperacumuladora	15
74	<i>Rinorea multivenosa</i>	Violaceae	Zn	Hiperacumuladora	8520
75	<i>Blepharidium guatemalense</i>	Rubiaceae	Ni	Hiperacumuladora	19000
76	<i>Pfaffia sarcophylla</i>	Amaranthaceae	Ni	Hiperacumuladora	830
77	<i>Lippia lupulina</i>	Verbenaceae	Ni	Hiperacumuladora	3000
78	<i>Justicia lanstykii</i>	Acanthaceae	Ni	Hiperacumuladora	3150
79	<i>Leandra australis</i>	Melastomataceae	Al	Hiperacumuladora	5794,6
80	<i>Miconia corallina</i>	Melastomataceae	Al	Hiperacumuladora	2154,3
81	<i>Tibouchina heteromalla</i>	Melastomataceae	Al	Hiperacumuladora	892,9
82	<i>Euterpe oleracea</i>	Arecaceae	Al	Hiperacumuladora	4241,4
83	<i>Baccharis trimera</i>	Asteraceae	Cu	Fitostabilizadora	476,1
84	<i>Equisetum giganteum</i>	Equisetaceae	Cu	Fitostabilizadora	398,2
85	<i>Equisetum giganteum</i>	Equisetaceae	Pb	Fitostabilizadora	2,7
86	<i>Eryngium horridum</i>	Apiaceae	Cu	Fitostabilizadora	289
87	<i>Eryngium horridum</i>	Apiaceae	Pb	Fitostabilizadora	5,2
88	<i>Oenothera sp.</i>	Onagraceae	Pb	Fitostabilizadora	3
89	<i>Plantago tomentosa</i>	Plantaginaceae	Pb	Fitostabilizadora	7,8
90	<i>Solanum viarum</i>	Solanaceae	Pb	Fitostabilizadora	33
91	<i>Dicranopteris nervosa</i>	Gleicheniaceae	Cu	Fitostabilizadora	56,6
92	<i>Eryngium horridum</i>	Apiaceae	Cu	Fitostabilizadora	26,9
93	<i>Eryngium horridum</i>	Apiaceae	Zn	Fitostabilizadora	924
94	<i>Eryngium horridum</i>	Apiaceae	Cd	Fitostabilizadora	1,1
95	<i>Eryngium horridum</i>	Apiaceae	Ni	Fitostabilizadora	4
96	<i>Eryngium horridum</i>	Apiaceae	Ba	Fitostabilizadora	0,1
97	<i>Senecio brasiliensis</i>	Asteraceae	Zn	Fitostabilizadora	373,2



Item	Espécie	Família Botânica	Metal	Categoria	Concentração de metal (mg/kg) ⁶
98	<i>Senecio leptolobus</i>	Asteraceae	Cu	Fitostabilizadora	26,8
99	<i>Senecio leptolobus</i>	Asteraceae	Cd	Fitostabilizadora	3
100	<i>Senecio leptolobus</i>	Asteraceae	Ba	Fitostabilizadora	0,8
101	<i>Cyperus eragrostis</i>	Cyperaceae	Ni	Fitostabilizadora	10,8
102	<i>Baccharis trimera</i>	Asteraceae	Cu	Fitostabilizadora	93,4
103	<i>Baccharis trimera</i>	Asteraceae	Ba	Fitostabilizadora	1,3
104	<i>Hyptis brevipes</i>	Lamiaceae	Zn	Fitostabilizadora	1311,1
105	<i>Hyptis brevipes</i>	Lamiaceae	Cd	Fitostabilizadora	7,1
106	<i>Typha domingensis</i>	Typhaceae	As	Fitostabilizadora	100
107	<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae	As	Fitostabilizadora	39,6
108	<i>Helianthus annuus</i>	Asteraceae	As	Fitostabilizadora	44,7
109	<i>Brachiaria decumbens</i> (cultivar Basilisk)	Poaceae	Pb	Fitostabilizadora	4,9
110	<i>Bauhinia unguolata</i>	Fabaceae	Cu	Fitostabilizadora	183
111	<i>Combretum aff. Pisonioides</i>	Combretaceae	Cu	Fitostabilizadora	249
112	<i>Combretum leprosum</i>	Combretaceae	Cu	Fitostabilizadora	182
113	<i>Croton blanchetianus</i>	Euphorbiaceae	Cu	Fitostabilizadora	168
114	<i>Hymenaea courbaril</i>	Fabaceae	Cu	Fitostabilizadora	136
115	<i>Myrcia splendens</i>	Myrtaceae	Fe	Fitostabilizadora	203,6*
116	<i>Diplusodon microphyllus</i>	Lythraceae	Fe	Fitostabilizadora	154,7*
117	<i>Dalbergia villosa</i>	Fabaceae	Fe	Fitostabilizadora	214,9*
118	<i>Senna reniformis</i>	Fabaceae	Al	Fitostabilizadora	58,4*
119	<i>Senna reniformis</i>	Fabaceae	Fe	Fitostabilizadora	172,1*
120	<i>Byrsonima variabilis</i>	Malpighiaceae	Al	Fitostabilizadora	87,9*
121	<i>Byrsonima variabilis</i>	Malpighiaceae	Fe	Fitostabilizadora	201,3*
122	<i>Erythroxylum gonocladum</i>	Erythroxylaceae	Fe	Fitostabilizadora	176,3*
123	<i>Ouratea semiserrata</i>	Ochnaceae	Al	Fitostabilizadora	55,7*
124	<i>Ouratea semiserrata</i>	Ochnaceae	Fe	Fitostabilizadora	90,6*
125	<i>Periandra mediterranea</i>	Fabaceae	Al	Fitostabilizadora	46,6*
126	<i>Typha domingensis</i>	Typhaceae	As	Rizofiltradora	100