

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Avaliação de uma área minerada em processo de restauração com *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e outras espécies da Mata Atlântica, Serra da Mantiqueira, Águas da Prata, SP

Beatriz Diniz de Castro
Magister Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026

BEATRIZ DINIZ DE CASTRO

Avaliação de uma área minerada em processo de restauração com *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e outras espécies da Mata Atlântica, Serra da Mantiqueira, Águas da Prata, SP

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Sebastiao Venancio Martins

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C355a
2026

Castro, Beatriz Diniz de, 1997-

Avaliação de uma área minerada em processo de restauração com *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e outras espécies da Mata Atlântica, Serra da Mantiqueira, Águas da Prata, SP / Beatriz Diniz de Castro. – Viçosa, MG, 2026.
1 dissertação eletrônica (102 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Sebastião Venâncio Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.309>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Florestas - Reprodução - Mantiqueira, Serra da (MG e SP). 2. Recuperação ecológica - Mantiqueira, Serra da (MG e SP). 3. Bauxita - Minas e mineração - Mantiqueira, Serra da (MG e SP). I. Martins, Sebastião Venâncio, 1965-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.9231

BEATRIZ DINIZ DE CASTRO

Avaliação de uma área minerada em processo de restauração com *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e outras espécies da Mata Atlântica, Serra da Mantiqueira, Águas da Prata, SP

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Beatriz Diniz de Castro
Autora

Sebastiao Venancio Martins
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 26/06/2026 às 10:45:03 e pelo orientador em 03/07/2026 às 09:20:06. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **NPNA.NXWM.I23M** e clique no botão 'Validar documento'.

Dedico este trabalho aos que me fortaleceram com afeto, incentivo e amizade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles — familiares, amigos, colegas, professores e servidores — que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. A colaboração é um dos pilares da vida em comunidade, e deixo aqui meu sincero reconhecimento a todos que, em diferentes momentos, estenderam a mão e tornaram essa caminhada mais feliz.

Agradeço imensamente ao meu orientador, que tornou a trajetória na pós-graduação mais leve e enriquecedora, sempre com compreensão, solícito e organizado. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, e também para minha formação acadêmica e pessoal, principalmente pelo compartilhamento de conhecimentos sobre nossas florestas e sua ecologia.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal pela oportunidade e pela infraestrutura disponível para a realização deste estudo; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de pesquisa; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de produtividade em pesquisa do orientador; e à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), pelo financiamento do projeto e apoio logístico.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

CASTRO, Beatriz Diniz de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Avaliação de uma área minerada em processo de restauração com *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e outras espécies da Mata Atlântica, Serra da Mantiqueira, Águas da Prata, SP.** Orientador: Sebastiao Venancio Martins.

A restauração florestal é essencial para recuperar ecossistemas degradados, restabelecendo a estrutura da vegetação, promovendo a sucessão ecológica e garantindo a conservação da biodiversidade, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. Na Serra da Mantiqueira, a degradação de florestas nativas por pastagens, monoculturas e áreas urbanas fragmentou a paisagem e provocou grandes perdas de biodiversidade, incluindo espécies ameaçadas como *Araucaria angustifolia*, espécie-chave das Florestas com Araucária. Embora a mineração de bauxita cause impactos relativamente menores, em comparação a outras atividades mineradoras, a remoção da vegetação e da camada superficial do solo ainda exige ações de restauração florestal. Parcerias entre empresas mineradoras e instituições de pesquisa, como a Companhia Brasileira de alumínio (CBA) e a Universidade Federal de Viçosa (UFV), têm permitido avaliar a efetividade dessas práticas. Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a restauração florestal em uma área após mineração de bauxita, focando em três aspectos: regeneração natural, banco de sementes do solo e estoque de carbono em *A. angustifolia*. A área de estudo foi minerada há 20 anos e pertencente a empresa CBA. Localizada no município de Águas da Prata, SP, sudeste do Brasil. Para amostragem, dividiu-se a área em 40 parcelas de 2x2 m, onde foram mensuradas a regeneração natural (DNS e altura) e o estrato arbóreo (CAP e altura), além da coleta do banco de sementes, de serapilheira e de amostras de solo. Além disso, todos os indivíduos de *A. angustifolia* da área de estudo foram mensurados (DAP e altura) e plaqueteados para monitoramento. Em geral, os resultados indicaram forte presença de *Actinostemon verticillatus* tanto no componente arbóreo, quanto na regeneração. No entanto, no banco de sementes do solo foi possível constatar que a espécie não está se dispersando com abundância, indicando uma mudança na direção de progressão da sucessão ecológica. Pode-se inferir o mesmo comportamento para a espécie invasora *Leucaena leucocephala*, que apesar de estar presente, não apresenta riscos para área, principalmente devido a sua baixa adaptabilidade a regiões de clima ameno e com ocorrência de geadas. De forma geral, na área foram detectados pontos muito positivos para o retorno das funções ecológicas, como ocorrência de muitas espécies

zoocóricas, bons índices de diversidade para o componente arbóreo e baixa ocorrência de espécies exóticas. A espécie de relevante interesse da região, *Araucaria angustifolia*, além de ser uma espécie chave para as florestas ombrófilas mistas, também é uma espécie com características estruturais favoráveis ao avanço da sucessão ecológica em áreas de restauração. Os resultados mostraram que possui grande potencial de estocagem de carbono, contribuindo com altos valores de dominância. A presença da espécie, juntamente com o avanço da estrutura florestal arbórea e bons atributos de solo encontrados, indicam que a área em restauração tem cumprido seu papel de retornar com os processos ecológicos naturais, após a mineração sustentável.

Palavras-chave: Palavras-chave: Floresta Ombrófila Mista; Mineração de bauxita; Mineração sustentável.

ABSTRACT

CASTRO, Beatriz Diniz de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026.
Assessment of a mined area undergoing restoration with *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze and other Atlantic Forest species, Mantiqueira Mountain Range, Águas da Prata, SP. Adviser: Sebastiao Venancio Martins.

Forest restoration is essential for recovering degraded ecosystems by reestablishing vegetation structure, promoting ecological succession, and ensuring biodiversity conservation, in addition to contributing to climate change mitigation. In the Serra da Mantiqueira, the conversion of native forests into pastures, monocultures, and urban areas has fragmented the landscape and caused significant biodiversity losses, including threatened species such as *Araucaria angustifolia*, a keystone species of Araucaria Forests. Although bauxite mining causes relatively smaller impacts, the removal of vegetation and the topsoil layer still requires forest restoration actions. Partnerships between mining companies and research institutions, such as the Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) and the Federal University of Viçosa (UFV), have enabled the evaluation of the effectiveness of these practices. Thus, the present study aims to evaluate forest restoration in a post-mining area, focusing on three aspects: natural regeneration, the soil seed bank, and carbon stock of *Araucaria* trees. The study area is a site restored 20 years ago after bauxite mining, owned by CBA, located in the municipality of Águas da Prata, São Paulo State, southeastern Brazil. For sampling, the area was divided into 40 plots of 2 × 2 m, where natural regeneration (seedling density and height) and the tree layer (circumference at breast height and height) were measured, in addition to soil seed bank sampling and soil collection. Furthermore, all individuals of *Araucaria angustifolia* in the study area were measured (diameter at breast height and height) and tagged for monitoring. Overall, the results indicated a strong presence of the species *Actinostemon verticillatus* in both the tree component and the regeneration layer. However, analysis of the soil seed bank showed that this species is no longer dispersing as intensely, indicating a shift in the direction of ecological successional progression. The same can be said for the invasive species *Leucaena leucocephala*, which, although present, does not pose a risk to the area, mainly due to its low adaptability to mild climates with frost occurrence. In general, the area showed very positive indicators for the recovery of ecological functions, such as the occurrence of many zoochorous species, good diversity indices for the tree component, and low occurrence of exotic species. The species of major regional interest, *Araucaria angustifolia*, in addition to being a keystone species in the

dynamics of mixed ombrophilous forests, also proved to have structural characteristics favorable for stimulating ecological succession in restoration areas. The results showed that it has a high potential for carbon storage, contributing high dominance values. The presence of this species, together with the advancement of forest structure and the favorable soil attributes observed, indicates that the restored area has fulfilled its role in reestablishing natural ecological processes after sustainable mining.

Keywords: Keywords: Mixed Ombrophilous Forest; Bauxite Mining; Sustainable Mining.

Sumário

INTRODUÇÃO GERAL	11
REFERÊNCIAS.....	14
Capítulo 1: Regeneração natural e estrutura do dossel como indicadores ecológicos da restauração florestal em áreas pós-mineração de bauxita na Serra da Mantiqueira, sudeste do Brasil.....	18
1 INTRODUÇÃO	20
2 MATERIAL E MÉTODOS	22
2.1 Área de estudo	22
2.2 Amostragem da regeneração natural	24
2.3 Fotos hemisféricas	27
2.4 Análise fitossociológica da regeneração natural.....	28
3 RESULTADOS.....	29
3.1 Parâmetros fitossociológicos.....	29
3.2 Abertura de dossel	31
4 DISCUSSÃO	33
5 CONCLUSÕES	36
6 REFERÊNCIAS	37
Capítulo 2: Banco de sementes do solo de uma área em restauração pós-mineração de bauxita, Águas da Prata-SP, Sudeste do Brasil.....	46
1 INTRODUÇÃO	48
2 MATERIAL E MÉTODOS	50
2.1 Área de estudo	50
2.2 Amostragem	51
2.3 Análise de dados	53
3 RESULTADOS.....	54
3.1 Fitossociologia do banco de sementes do solo	54
4 DISCUSSÃO	60
5 CONCLUSÕES	62
6 REFERÊNCIAS	63
Capítulo 3: Estrutura fitossociológica e estoque de carbono associados à presença de <i>Araucaria angustifolia</i> em área minerada em processo de restauração florestal.....	72
1 INTRODUÇÃO	76
2 MATERIAL E MÉTODOS	78
2.1 Área de estudo	78

2.2 Coleta de dados	79
2.3 Análise de dados	81
3 RESULTADOS.....	82
3.1 Estoque de carbono de <i>Araucaria angustifolia</i>	82
3.2 Fitossociologia da floresta em restauração	83
3.3 Análise de solo.....	86
3.4 Serapilheira	88
4 DISCUSSÃO	89
5 CONCLUSÃO.....	93
6 REFERÊNCIAS	94
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102

INTRODUÇÃO GERAL

A restauração florestal possui um papel fundamental na recuperação de ecossistemas degradados, buscando restabelecer suas características originais com base em um ecossistema de referência (Martins, 2018; Díaz, 2019; Zanini *et al.*, 2021). Esse processo envolve a reconstrução da estrutura da vegetação, a garantia de uma diversidade mínima e a promoção da sucessão ecológica natural (Martins *et al.*, 2015). Ecossistemas em equilíbrio são importantes para a conservação da biodiversidade, o fornecimento de recursos naturais e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Benayas *et al.*, 2009; Martins *et al.*, 2020). Reconhecendo essa importância, a Organização das Nações Unidas (ONU) declarou 2021-2030 como a “Década da Restauração de Ecossistemas”, mostrando a necessidade de reverter os impactos da degradação ambiental e restaurar a função original dos ecossistemas (UN & FAO, 2023).

A Serra da Mantiqueira é um exemplo de região em que a Mata Atlântica tem sido muito impactada pela degradação ambiental ao longo das últimas décadas (Mendes Junior *et al.*, 1991; Tabarelli *et al.*, 2005; Detzel *et al.*, 2018). Localizada entre os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro (Machado Filho *et al.* 1983), a região se destaca pela diversidade de suas paisagens e pela riqueza de sua biodiversidade, sendo reconhecida como uma Área de Importância Biológica Especial e um *hotspot* de biodiversidade (Myers *et al.*, 2000; Costa; Herrmann, 2006; Pompeu *et al.*, 2018; Gonzaga *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2023). Contudo, a conversão de florestas nativas em pastagens e monoculturas, juntamente com a expansão urbana, fragmentou a paisagem e provocou a perda de grande parte dessa biodiversidade (Detzel *et al.*, 2018). Dessa forma, as iniciativas de restauração florestal tornam-se muito importantes para recuperar a função ecológica da Serra da Mantiqueira, preservando seus serviços ecossistêmicos e protegendo espécies nativas, como a araucária (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze), um símbolo da região, que está incluída na Lista Oficial da Flora Brasileira Ameaçada de Extinção (Brasil, 2022).

Além da escolha de espécies nativas adequadas à região, a efetividade da restauração florestal também depende do monitoramento de indicadores ecológicos capazes de refletir o progresso do ecossistema em recuperação (Oliveira & Engel, 2018; Zangalli *et al.*, 2023) e, caso necessário, indicar ações de manejo adaptativo. Nesse contexto, os bioindicadores desempenham papel essencial na avaliação da trajetória da

restauração, pois permitem inferir se os processos ecológicos estão sendo restabelecidos de forma satisfatória ao longo do tempo. Entre alguns exemplos de bioindicadores utilizados nesse tipo de avaliação destacam-se a quantidade de serapilheira acumulada sobre o solo, relacionada à ciclagem de nutrientes e à proteção do solo; o banco de sementes do solo, que indica o potencial de regeneração e a disponibilidade de propágulos para a continuidade da sucessão ecológica; a regeneração natural, que demonstra a capacidade do ecossistema de se restabelecer espontaneamente; e o estoque de carbono na biomassa vegetal, importante para avaliar a recuperação da estrutura florestal e o papel da vegetação na mitigação das mudanças climáticas (De Azevedo *et al.*, 2018; Caldeira *et al.*, 2019; Piaia *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2024; Dueñez *et al.*, 2025). Embora esses sejam alguns dos indicadores mais utilizados, diversos outros bioindicadores também podem ser empregados para compreender a dinâmica da restauração.

No contexto das espécies nativas, a *Araucaria angustifolia* possui grande importância ecológica, sendo uma espécie-chave na formação das Florestas com Araucária, especialmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (Bogoni *et al.*, 2020). Além de seu papel ambiental, a espécie tem importância cultural e econômica, sendo um símbolo do estado do Paraná e da Serra da Mantiqueira, onde suas sementes comestíveis (os pinhões) são muito utilizadas na alimentação (Rocha *et al.*, 2024). No entanto, apesar de sua importância, ela ainda é pouco utilizada em projetos de restauração florestal dentro de sua área de ocorrência (Kissmann *et al.*, 2020). Entre as poucas iniciativas que adotam a araucária na recuperação ambiental, destacam-se os projetos de mineração de bauxita, na região de Poços de Caldas, MG, e Águas da Prata, SP, que ao restaurar áreas degradadas pela mineração, buscam reintroduzir espécies nativas para retornar com a vegetação original.

Na Serra da Mantiqueira, a mineração de bauxita é muito pontual, ocupando pequenas áreas temporariamente e gerando baixo impacto ambiental, o que possibilita uma recuperação mais rápida dos ecossistemas (Kamble & Bhosale, 2019; Balestrin *et al.*, 2020), isso porque a bauxita ocorre em camadas superficiais do solo. Isso permite que a extração seja feita sem a necessidade de escavações profundas ou túneis subterrâneos, diminuindo muito a movimentação das camadas do solo (Tost *et al.*, 2018). No entanto, como toda atividade minerária, a mineração de bauxita resulta em algum nível de impacto devido à remoção da vegetação e da camada mais superficial do solo e sendo importante a adoção de práticas de restauração florestal para a recuperação dessas áreas após o fechamento das minas.

A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), com sede no município de Poços de Caldas, Minas Gerais, é a unidade mais antiga da empresa, e possui atividades mineradoras na região desde a década de 1950. Ao longo dos anos, a CBA tem adotado uma abordagem com foco na sustentabilidade, dando prioridade a restauração florestal das áreas mineradas. A empresa sempre investe em projetos e iniciativas de plantio de espécies nativas, buscando recompor a vegetação e restaurar a função ecológica das áreas mineradas. Nesse contexto, uma parceria entre a CBA e o Laboratório de Restauração Florestal (LARF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) viabilizou este estudo para avaliar a evolução de uma área minerada em restauração há 20 anos. Essa parceria é fundamental para analisar a efetividade das práticas de restauração adotadas e gerar conhecimento que possa contribuir para a melhoria dos métodos de restauração florestal, auxiliando tanto a empresa quanto futuras iniciativas de restauração na região da Serra da Mantiqueira.

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a restauração florestal em uma área após a mineração, focando em três aspectos: regeneração natural, banco de sementes do solo, serapilheira e estoque de carbono pelas árvores de *Araucaria angustifolia*. A regeneração natural foi analisada para avaliar a capacidade da floresta de se restabelecer espontaneamente. O banco de sementes foi importante para avaliar o potencial de resiliência da área, identificando a disponibilidade de propágulos para dar continuidade à sucessão ecológica. Já o cálculo de estoque de carbono de *Araucaria angustifolia* forneceu informações sobre o papel dessa espécie na captura de carbono, destacando sua importância para a recuperação da floresta. A dissertação está dividida em três capítulos e, de forma complementar, esses tópicos serão interpretados em conjunto com outros indicadores importantes, como a abertura do dossel, fitossociologia e os atributos do solo, mostrando a efetividade da restauração na área minerada.

REFERÊNCIAS

- Balestrin, D., Martins, S., Fonseca, C. (2020). Ecological restoration and forest coverage advancement in a region influenced by bauxite mining, Minas Gerais, Brazil. In: Vlieger, K. (Ed.). Recent advances in ecological restoration. New York: Nova Science Publishers, 143–154.
- Benayas, J., Newton, A., Diaz, A., Bullock, J. (2009). Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, 325(5944), 1121–1124.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2022). Portaria MMA n.º 148, de 7 de junho de 2022. Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-148-de-7-de-junho-de-2022-408051474>. Acesso em: maio de 2025.
- Bogoni, J. A., Muniz-Tagliari, M., Peroni, N., & Peres, C. A. (2020). Testing the keystone plant resource role of a flagship subtropical tree species (*Araucaria angustifolia*) in the Brazilian Atlantic Forest. *Ecological Indicators*, 118, 106778. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106778>.
- Caldeira, M. V. W., Godinho, T. D. O., Moreira, F. L., Campanharo, Í. F., Castro, K. C., Mendonça, A. R. D., Trazzi, P. A. (2019). Litter as an ecological indicator of forest restoration processes in a dense ombrophylous lowland forest. *Floresta e Ambiente*, 26(spe1), e20180411. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.041118>.
- Chazdon, R. (2008). Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 320(5882), 1458–1460.
- Costa, C., Herrmann, G. (2006). O corredor ecológico da Mantiqueira. In: Costa, C., Herrmann, G., Pinto, I., Costa, P. (Eds.). Plano de ação do corredor ecológico da Mantiqueira. Belo Horizonte: Valor Natural, 13–29.
- De Azevedo, A. D., Rocha Francelino, M., Camara, R., Gervasio Pereira, M., dos Santos Leles, P. S. (2018). Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. *Floresta*, 48(2). <https://doi.org/10.5380/rf.v48i2.54447>.

Detzel, V., Baldim, M., Cit, C., Lamberti, S. (2018). Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Plano de manejo da Área de Proteção Ambiental da Serra da Mantiqueira. Detzel Consultores Associados S/S EPP. Brasília.

Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E., Ngo, H., Agard, J., Arneth, A., Zayas, C. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471).

Dueñez, L. K. S., Martins, S. V., Fonseca, W. S., Corrêa, F. D. D., Abreu, A. Y. N., Cruz, Y. G. (2025). Soil seed bank as a bioindicator of compensatory forest restoration to bauxite mining, Southeast Brazil. *Revista Delos*, 18(66), e4910-e4910. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n66-149>.

Gonzaga, D., Menini Neto, L., Peixoto, A. (2020). Cactaceae na Serra da Mantiqueira, Brasil. *Rodriguésia*, 71, e02572018.

Kamble, P. & Bhosale, S. (2019). Assessment of impact of bauxite mining on environment. *i-Manager's Journal on Future Engineering and Technology*, 14(4), 14–21.

Kissmann, C., Pozzan, M., Sausen, T. L., Simões, D. A. (2020). Modelos de plantios e atributos funcionais de espécies nativas utilizadas em projetos de restauração em Floresta com Araucária. *Ciência Florestal*, 30(4), 1103–1115. <https://doi.org/10.5902/1980509840924>.

Machado-Filho, L., Ribeiro, M., Gonzalez, S., *et al.* (1983). Geologia. In: Projeto RADAMBRASIL Vol. 32. Folhas SF 23/24 Rio de Janeiro/Vitória, MEE/SG, 56–66.

Martins, S. (2018a). Restauração florestal. *Boletim de Extensão*. Viçosa: Editora UFV, 67, 1–19.

Martins, S., Miranda Neto, A., Ribeiro, T. (2015). Uma abordagem sobre diversidade e técnicas de restauração ecológica. In: Martins, S. (Ed.). *Restauração ecológica de ecossistemas degradados*. 2ª edição. Viçosa: Editora UFV.

Martins, S., Cosimo, L., Balestrin, D., Fonseca, W., Andrade, C., Barros, R. (2020). Restoration of tree and shrub diversity post bauxite mining, in the southeastern region of

Minas Gerais, Brazil. In: Vlieger, K. (Org.). Recent advances in ecological restoration. Estados Unidos: Nova, 1, 33–62.

Mendes Júnior, L., Antoniazzi, M., Vieira, M., Susemihl, P. (1991). Relatório Mantiqueira. São Paulo: FEDAPAM.

Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C., Fonseca, G., Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853–858.

Oliveira, R. E. de, & Engel, V. L. (2018). Indicadores de monitoramento da restauração na Floresta Atlântica e atributos para ecossistemas restaurados. *Scientia Plena*, 13(12). <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2017.127301>

Oliveira, A. M. C.; Botelho, S. A.; Silva, M. A. P. da; Nogueira, M. O. G.; Melo, L. A. (2024). Aspectos funcionais do banco de sementes como indicador de restauração florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, [S. l.], v. 44. <https://doi.org/10.4336/2024.pfb.44e202002085>.

Piaia, B. B., Rovedder, A. P. M., Procknow, D., Camargo, B., Gazzola, M. D., Croda, J. P., de Moraes Stefanello, M. (2020). Natural regeneration as an indicator of ecological restoration by applied nucleation and passive restoration. *Ecological Engineering*, 157, 105991. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105991>.

Pompeu, P., Fontes, M., Mulligan, M., Bueno, I., Siqueira, M., Acerbi Júnior, F., Kamino, L., Waterloo, M., Bruijnzeel, L. (2018). Assessing Atlantic cloud forest extent and protection status in southeastern Brazil. *Journal for Nature Conservation*, 43, 1–12.

Rocha, M., Martins, S., Alves, W., Fonseca, S., Soares, K. (2023). Análise fitossociológica e valor de importância em carbono de áreas em restauração florestal na Serra da Mantiqueira, Minas Gerais, Brasil. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 16(47), 2526–2548.

Rocha, I. C., Freitas, M. L. B., Martins, I. F., & Cini, R. A. (2024). Pinhão na alimentação tradicional dos Kaingang do Paraná: aspectos culturais, ecológicos e alimentares. *Revista*

de Alimentação e Cultura das Américas (RACA), 6(1).
<https://doi.org/10.35953/raca.v6i1.216>.

Tabarelli, M., Pinto, L., Silva, J., Hirota, M., Bedê, L. (2005). Desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade na Mata Atlântica. *Megadiversidade*, 1, 132–138.

Tost, M., Bayer, B., Hitch, M., Lutter, S., Moser, P., Feiel, S. (2018). Metal Mining's Environmental Pressures: A Review and Updated Estimates on CO₂ Emissions, Water Use, and Land Requirements. *Sustainability*, 10(8), 2881.
<https://doi.org/10.3390/su10082881>.

UN, FAO. (s.d.). United Nations Environment Programme & Food and Agriculture Organisation. Nine more years to restore the planet. Disponível em:
<https://www.decadeonrestoration.org/pt-br>. Acesso em: 29 de março de 2025.

Zanini, A., et al. (2021). The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, 481, 1–11.

Zangalli, C., Fockink, G. D., de Almeida, B. R. S., de Oliveira, E., de Goes, M. P., Nicoletti, M. F., Floriani, M. M. P., Kanieski, M. R. (2023). Ecological indicators of forest regeneration in areas of Araucaria Forest in South Brazil. *Ecological Engineering*, 194, 107035. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107035>.

Capítulo 1: Regeneração natural e estrutura do dossel como indicadores ecológicos da restauração florestal em áreas pós-mineração de bauxita na Serra da Mantiqueira, sudeste do Brasil

Resumo

A análise da regeneração natural em áreas mineradas é fundamental para compreender a reativação de processos ecológicos e a trajetória sucessional dos ecossistemas em restauração. A composição, a estrutura e a diversidade do estrato regenerante fornecem informações diretas sobre a resiliência ecológica do sistema e sua resposta a condicionantes estruturais, como a abertura do dossel. Assim, este estudo avaliou a efetividade da restauração florestal por meio da análise fitossociológica da regeneração natural e da abertura do dossel em área minerada pela Companhia Brasileira de Alumínio, localizada em Águas da Prata (SP). A regeneração natural foi avaliada em uma área de 0,6 ha anteriormente utilizada para a extração de bauxita, utilizando 40 parcelas de 2×2 m e fotografias hemisféricas para a estimativa da abertura do dossel. Os resultados indicaram elevada dominância da espécie nativa *Actinostemon verticillatus*, expressa por um alto Índice de Valor de Importância ($IVI = 53,99\%$), um baixo índice de diversidade de Shannon–Wiener ($H' = 1,67$) e baixa equabilidade de Pielou ($J' = 0,50$). Além disso, foram registradas espécies com potencial de atração da fauna, indicando a dispersão de sementes por animais a partir de fragmentos florestais próximos e sua contribuição para o avanço da sucessão ecológica. Considerando o histórico de uso da área, os padrões observados sugerem que as ações de restauração têm favorecido o restabelecimento da regeneração natural e a reativação de processos ecológicos.

Palavras-chave: Abertura do dossel; Bioindicadores; Floresta Ombrófila Mista; Regeneração; Sustentabilidade.

Abstract

Natural regeneration in mined areas is a key process for understanding the reactivation of ecological dynamics and the successional trajectories of ecosystems under restoration. The composition, structure, and diversity of the regenerating stratum provide direct insights into ecosystem resilience and its response to structural drivers such as canopy openness. Therefore, this study evaluated the effectiveness of forest restoration through a phytosociological assessment of natural regeneration and canopy openness in environmental compensation areas of Companhia Brasileira de Alumínio, located in Águas da Prata, São Paulo State, Brazil. Natural regeneration was assessed within a 0.6 ha area previously subjected to bauxite mining using forty 2×2 m plots, and hemispherical photographs were used to estimate canopy openness. The results revealed a high dominance of *Actinostemon verticillatus*, reflected by a high Importance Value Index (IVI = 53.99%), accompanied by low Shannon–Wiener diversity ($H' = 1.667$) and low Pielou's evenness ($J' = 0.500$). Additionally, species with fauna-attracting potential were recorded, suggesting the influence of seed dispersal from adjacent forest fragments and their contribution to successional advancement. Considering the land-use history, the observed patterns indicate that restoration actions have promoted the reestablishment of natural regeneration and the reactivation of key ecological processes.

Keywords: Canopy openness; Bioindicators; Mixed Ombrophilous Forest; Regeneration; Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

Mudanças globais no uso da terra, juntamente com a simplificação estrutural das paisagens e alterações nos fluxos de carbono e nutrientes, têm destacado a restauração florestal como uma abordagem central nas agendas ambientais internacionais (Bastin *et al.*, 2019; Rodríguez-Uña *et al.*, 2020). Essa urgência é destacada por organizações internacionais, como a Organização das Nações Unidas e o Acordo de Paris, que estabeleceram metas para restaurar milhões de hectares de florestas, com o objetivo de mitigar os efeitos das mudanças climáticas e conservar a biodiversidade (UNGA, 2019). Dessa forma, é importante que os projetos de restauração florestal sejam bem planejados e adaptados às particularidades ecológicas de cada área (Gann *et al.*, 2019; Liu, 2025).

Neste contexto, a restauração de áreas mineradas representa uma abordagem única para promover a recuperação estrutural e funcional dos ecossistemas, atendendo às demandas e metas de restauração estabelecidas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente o ODS 15 – Vida Terrestre (Stuble *et al.*, 2017; Rodríguez-Uña *et al.*, 2020; Fonseca *et al.*, 2024). No caso da mineração de bauxita, a extração envolve a remoção da camada superficial do solo, onde o minério se concentra a poucos metros de profundidade (Kamble & Bhosale, 2019). Esse processo resulta na perda dos horizontes mais férteis do solo, incluindo a matéria orgânica, os nutrientes e o banco de sementes, que são fundamentais para a manutenção do equilíbrio florestal (Barros *et al.*, 2012; Fengler *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2020). A adoção de práticas de restauração por parte das empresas mineradoras, além das exigências do licenciamento ambiental (CETESB-SP, 2024), contribui para a reestruturação da vegetação e para a retomada da sucessão ecológica, destacando o papel da mineração responsável na sustentabilidade dessa atividade (Martins *et al.*, 2020; Cosimo *et al.*, 2021; Fonseca *et al.*, 2023).

No entanto, a simples execução de projetos de restauração pode não garantir o sucesso do processo ecológico da área em recuperação. É necessário que seja feito o monitoramento contínuo e avaliações criteriosas da estrutura e qualidade da floresta ao longo do tempo (Brancalion *et al.*, 2015; Viani *et al.*, 2018; Balestrin *et al.*, 2025). Para isso, existem indicadores biológicos que funcionam como sinalizadores da resiliência do ecossistema, mostrando sua capacidade de se desenvolver sem intervenções humanas e de manter seus processos ecológicos (Oliveira & Engel, 2018; Zangalli *et al.*, 2023). Entre

esses principais indicadores utilizados, destacam-se a regeneração natural, o banco de sementes do solo, a deposição de serapilheira e ciclagem de nutrientes e o estoque de carbono (De Azevedo *et al.*, 2018; Caldeira *et al.*, 2019; Piaia *et al.*, 2020; Dueñez *et al.*, 2025; Oliveira *et al.*, 2025).

A regeneração natural representa diretamente a capacidade do ecossistema de se recuperar de forma espontânea (Piaia *et al.*, 2020). Este processo é influenciado por características estruturais da floresta, como a abertura do dossel, que determina quais espécies conseguem se estabelecer em função das suas exigências de luz (Schüler, 2016; Liu, 2025). A regeneração ocorre por meio do desenvolvimento de plantas a partir do banco de sementes do solo, da entrada de propágulos externos e da rebrota de estruturas subterrâneas remanescentes (Scoti *et al.*, 2011; De Paula *et al.*, 2023). Esses mecanismos indicam a retomada de funções ecológicas importantes para a sucessão florestal, incluindo dispersão, germinação e recrutamento de plântulas (Crouzeilles *et al.*, 2017). Por isso, a regeneração natural é muito utilizada como um bioindicador confiável da efetividade da restauração florestal, pois permite inferir o grau de independência da área em recuperação (Da Fonseca *et al.*, 2017; Balestrin *et al.*, 2025).

A análise da composição florística da regeneração natural é fundamental para compreender a dinâmica das comunidades vegetais e a ecologia das espécies locais, fornecendo informações sobre a direção da sucessão ecológica (Silva *et al.*, 2020; Fonseca *et al.*, 2024). Esse conhecimento é ainda mais relevante em ambientes minerados inseridos na Mata Atlântica, na fitofisionomia Floresta Ombrófila Mista, caracterizada pela ocorrência natural de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze., espécie símbolo da região (Quinteiro *et al.*, 2019). Como espécie nativa e ameaçada de extinção, a presença de *A. angustifolia* reforça a importância de boas práticas de restauração que promovam a recuperação do ambiente e sua diversidade (Bernardinis *et al.*, 2023). A integração do estudo da regeneração natural com variáveis estruturais, como a abertura do dossel, permite avaliar como esses fatores modulam o estabelecimento e a composição das espécies.

Considerando o contexto de áreas mineradas de bauxita e o seu histórico ecológico, este estudo busca avaliar a efetividade da restauração florestal 20 anos após a mineração de bauxita, em área inserida na Floresta Ombrófila Mista da Mata Atlântica. O objetivo geral foi utilizar a regeneração natural como bioindicador da trajetória sucessional da vegetação. Entre os objetivos específicos estão: (i) caracterizar a composição florística e a estrutura do estrato de regeneração natural; (ii) relacionar a

regeneração natural com variáveis estruturais da floresta, como abertura do dossel; e (iii) fornecer subsídios para aprimorar práticas de restauração. A análise da regeneração natural foi utilizada como ferramenta para diagnosticar o estágio sucessional da vegetação, sendo posteriormente relacionada à abertura do dossel, a fim de compreender como essa variável pode estar modulando o retorno das espécies e a efetividade das ações de recuperação ecológica adotadas ao longo dos últimos anos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma área de restauração florestal na região da Serra da Mantiqueira, na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, Sudeste do Brasil. A área está inserida no município de Águas da Prata – SP (21°56' 38" S; 46°42' 18" W). A vegetação do entorno é classificada como Floresta Ombrófila Mista (IBGE 2012), inserida no domínio Floresta Atlântica. O clima da região é Cwa segundo a classificação climática de Köppen, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos secos e amenos (Alvares *et al.*, 2013).

A área do presente estudo (Fig. 1), denominada Quirinos, pertence à Companhia Brasileira de Alumínio – CBA, onde a restauração florestal foi implantada em 2005 após finalizada a mineração de bauxita (Fig. 2). Localizada a 1.403 m de altitude, a área recebeu ações de recuperação pós-mineração como recomposição topográfica e reflorestamento com espécies arbóreas com plantio em área total.

A área de estudo está inserida em uma paisagem caracterizada por uma matriz heterogênea, composta por diferentes usos e coberturas do solo. No entorno da área em restauração são observadas outras áreas submetidas a processos de restauração florestal em diferentes estágios de desenvolvimento, refletindo diferentes períodos de implantação. Além disso, a paisagem inclui fragmentos remanescentes de floresta nativa, plantios monoculturais de eucalipto, áreas destinadas à pastagem e pontos de extração de bauxita, representando usos antrópicos comuns na região.

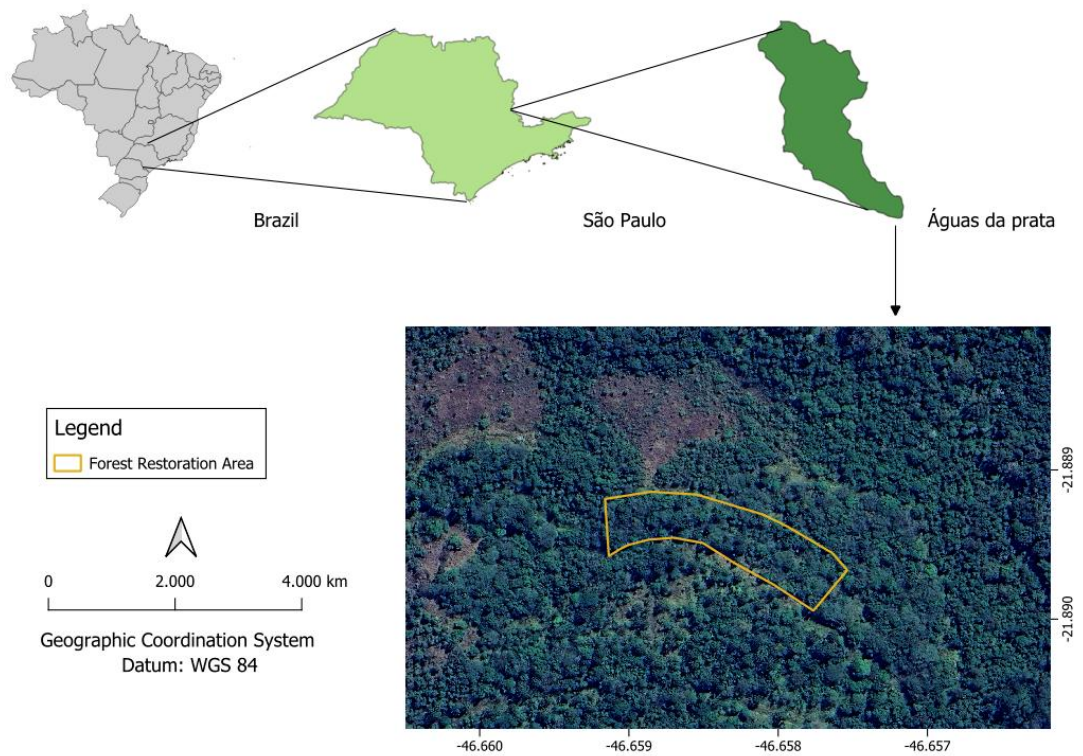


Figura 1: Mapa de localização da área de restauração estudada, Águas da Prata – SP, Sudeste do Brasil.



Figura 2: Área de estudo restaurada há 20 anos, com presença de indivíduos adultos de *Araucaria angustifolia*. Águas da Prata, SP.

2.2 Amostragem da regeneração natural

A de estudo possui um total de 0,6 ha de floresta restaurada, com aproximadamente 160 m de comprimento e 42 m de largura. Para garantir uma amostragem representativa, foram estabelecidas duas linhas de amostragem dentro da área, posicionadas a 14 m de distância uma da outra. Ao longo de cada linha, foram distribuídas 20 parcelas de 2×2 m, espaçadas em 8 m, totalizando 40 parcelas (Fig. 3).



Figura 3: Croqui da área de estudo indicando a distribuição das 40 parcelas amostrais instaladas na área de restauração florestal. Cada ponto amarelo representa a localização de uma parcela amostral.

Cada parcela foi marcada com estaca de madeira e foram usados gabaritos de bambu para delimitar o tamanho da parcela (Fig. 4). Dentro de cada parcela, foram medidos e identificados todos os indivíduos regenerantes, definidos como aqueles com altura igual ou superior a 0,5 m e com diâmetro ao nível do solo (DNS) $\leq 5,0$ cm. Com este critério de inclusão é possível incluir indivíduos já estáveis no ambiente, com menor risco de mortalidade. As medições foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital e uma trena a laser digital.



Figura 4: Delimitação das parcelas em campo com uso de estaca de madeira e gabaritos de bambu de 2x2 m.

As espécies que não foram possíveis identificar em campo, foram coletadas e fotografadas para posterior comparação com materiais depositados no herbário da Universidade Federal de Viçosa, herbários virtuais e literatura. Os nomes científicos foram atualizados de acordo com o Herbário Virtual Re flora e com o sistema do Angiosperm Phylogeny Group IV (APG IV, 2016).

2.3 Fotos hemisféricas

Para determinar a porcentagem de abertura do dossel, foram obtidas fotografias hemisféricas em cada uma das 40 parcelas avaliadas. As imagens foram capturadas com uma câmera Nikon DSLR acoplada ao adaptador fisheye Digital King 0.21×, que permite ampliar o campo de visão e registrar a projeção hemisférica do dossel. A câmera foi posicionada voltada para o céu, em um tripé nivelado e fixo, instalado no centro de cada parcela, garantindo padronização na orientação e evitando inclinações que pudessem distorcer as imagens (Fig. 5). Todas as fotografias foram obtidas a 1,3 m de altura, aproximadamente à altura do peito (DAP), conforme recomendado em levantamentos de estrutura de dossel (Song, *et al.*, 2018).



Figura 5: Posicionamento da câmera em tripé nivelado e fixo para captura de fotografias hemisféricas.

Foi obtida apenas uma fotografia por parcela, todas realizadas no mês de dezembro, representando um único período do ano. Essa estratégia foi adotada em função das características da região de estudo, inserida em área de floresta ombrófila, na qual há baixa variação sazonal na cobertura do dossel devido à elevada e relativamente constante disponibilidade hídrica ao longo do ano. Dessa forma, uma única campanha amostral foi considerada suficiente para representar a estrutura do dossel. Além disso, as fotografias foram capturadas no início da manhã, entre 7:30h e 9:00h, com o objetivo de reduzir a incidência direta de luz solar sobre as copas das árvores, evitando reflexos e contrastes excessivos que poderiam interferir na qualidade das imagens.

As imagens foram salvas no formato BMP, e, posteriormente, foram processadas no software Gap Light Analyzer – GLA 2.0 (Frazer *et al.*, 1999), utilizando o procedimento de binarização, no qual a fotografia é convertida em uma matriz de pixels pretos e brancos que representa, respectivamente, áreas de dossel fechado e de abertura ao céu. Manualmente, foi definido o melhor ajuste de contraste para cada foto, de modo a assegurar a consistência visual e minimizar vieses de segmentação decorrentes de variações de luminosidade entre parcelas.

Para verificar a existência de relação entre as variáveis densidade de indivíduos regenerantes e % de abertura de dossel, foi utilizado o Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e o nível de significância adotado foi 0,05.

2.4 Análise fitossociológica da regeneração natural

Os dados obtidos nas 40 parcelas foram utilizados para caracterizar a estrutura e a composição do estrato de regeneração natural na área de estudo. Os parâmetros fitossociológicos (frequência relativa, densidade relativa, dominância relativa e o índice de valor de importância - IVI) e os índices de diversidade (Shannon-Wiener e Equabilidade de Pielou) foram calculados com o auxílio do software Fitopac 2.1 (Shepherd, 2010). A área basal de cada indivíduo foi estimada com base no diâmetro ao nível do solo, por meio da fórmula:

$$AB = \pi \cdot (d^2 / 4)$$

em que d é o diâmetro em metros.

As unidades amostrais (parcelas) foram utilizadas como base para o cálculo da frequência, enquanto a densidade e a dominância foram expressas em valores relativos, permitindo a comparação da importância estrutural das espécies entre si e com outros estudos em ecossistemas semelhantes.

3 RESULTADOS

3.1 Parâmetros fitossociológicos

Foram amostrados 416 indivíduos regenerantes, distribuídos em 39 parcelas. Embora o delineamento original tivesse 40 unidades amostrais, uma delas não apresentou nenhum indivíduo regenerante e, por isso, foi desconsiderada nas análises fitossociológicas. Ao todo, foram registradas 28 espécies pertencentes a 14 famílias botânicas. Dentre estas, Euphorbiaceae destacou-se com mais da metade dos indivíduos amostrados (257 indivíduos), principalmente devido à espécie *Actinostemon verticillatus* ($n = 255$). As famílias Fabaceae ($n = 45$), Salicaceae ($n = 32$), Lythraceae ($n = 24$) e Primulaceae ($n = 18$) também foram expressivas para a regeneração. Entre as espécies mais abundantes, além de *A. verticillatus*, destacaram-se *Leucaena leucocephala* ($n = 40$), *Lafoensia pacari* ($n = 24$), *Casearia lasiophylla* ($n = 17$), *Myrsine coriacea* ($n = 15$) e *Casearia sylvestris* ($n = 15$).

Essas tendências de abundância e distribuição das espécies são detalhadas na Tabela 1, que apresenta os resultados da análise fitossociológica da regeneração natural na área amostrada. A espécie *Actinostemon verticillatus* apresentou os maiores valores para todos os parâmetros analisados, apresentando densidade relativa ($DR = 61,30$), frequência relativa ($FR = 22,39$) dominância relativa ($DoR = 78,30$) e índice de valor de importância ($IVI = 53,99\%$). Esses números confirmam a dominância ecológica da espécie na área estudada. Outras espécies que também se destacaram nos parâmetros fitossociológicos foram *Lafoensia pacari* ($IVI = 7,59\%$), *Leucaena leucocephala* ($IVI = 6,75\%$), *Myrsine coriacea* ($IVI = 5,79\%$) e *Casearia sylvestris* ($IVI = 4,5\%$). Por outro lado, diversas espécies apresentaram valores baixos de IVI (menores que 3), o que pode indicar ocorrência espaçada no sub-bosque.

Tabela 1. Parâmetros fitossociológicos das espécies regenerantes da área de estudo. N° ind.: número de indivíduos. DR (Densidade Relativa, %). FR (Frequência relativa, %). DoR (Dominância Relativa, %). IVI (Índice de Valor de Importância, %).

Espécies	N° indivíduos	Densidade Relativa	Frequência relativa	Dominância relativa	IVI (%)	Dispersão
<i>Actinostemon verticillatus</i> (Klotzsch) Baill.	255	61,3	22,39	78,3	53,99	zoo
<i>Lafoensia pacari</i> A.St.-Hil.	24	5,77	14,18	2,81	7,59	ane
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	40	9,62	8,96	1,67	6,75	ane
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	15	3,61	8,21	5,55	5,79	
<i>Casearia sylvestris</i> Sw.	15	3,61	8,21	1,69	4,50	ane
<i>Casearia lasiophylla</i> Eichler	17	4,09	5,97	2,66	4,24	auto
<i>Nectandra megapotamica</i> (Spreng.) Mez	6	1,44	3,73	1,12	2,10	zoo
<i>Psidium cattleianum</i> Sabine	4	0,96	2,99	1,24	1,73	auto
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	3	0,72	2,24	1,82	1,59	auto
<i>Bauhinia forficata</i> Link	4	0,96	2,24	0,05	1,09	auto
<i>Miconia</i> sp.	3	0,72	2,24	0,18	1,05	ane
<i>Endlicheria paniculata</i> (Spreng.) J.F.Macbr.	3	0,72	2,24	0,14	1,03	zoo
<i>Eugenia uniflora</i> L.	3	0,72	2,24	0,06	1,01	zoo
<i>Myrsine</i> sp.	3	0,72	1,49	0,25	0,82	zoo
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i> Lam.	3	0,72	1,49	0,19	0,80	ane
<i>Campomanesia</i> sp.	2	0,48	1,49	0,12	0,70	zoo
<i>Nectandra angustifolia</i> (Schrader) Nees & Mart.	2	0,48	1,49	0,06	0,68	zoo
<i>Baccharis dracunculifolia</i> DC.	3	0,72	0,75	0,15	0,54	zoo
<i>Vernonanthura</i> sp.	2	0,48	0,75	0,36	0,53	zoo
<i>Croton urucurana</i> Baill.	1	0,24	0,75	0,47	0,49	zoo
<i>Guarea guidonea</i> (L.) Sleumer	1	0,24	0,75	0,41	0,47	zoo
<i>Alchornea glandulosa</i> Poepp. & Endl.	1	0,24	0,75	0,18	0,39	zoo
<i>Cabralea canjerana</i> (Vell.) Mart.	1	0,24	0,75	0,15	0,38	zoo
<i>Myrcia splendens</i> (Sw.) DC.	1	0,24	0,75	0,12	0,37	zoo
<i>Piper aduncum</i> L.	1	0,24	0,75	0,07	0,35	zoo
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	1	0,24	0,75	0,06	0,35	zoo
<i>Dasyphyllum brasiliense</i> (Spreng.) Cabrera	1	0,24	0,75	0,05	0,35	zoo
<i>Machaerium nyctitans</i> (Vell.) Benth.	1	0,24	0,75	0,04	0,34	zoo
Total	416					

Em relação aos índices de diversidade, o índice de Shannon-Wiener obtido para a comunidade regenerante foi de $H' = 1,67$, enquanto a equabilidade de Pielou apresentou valor de $J' = 0,50$. Esse valor ressalta maior abundância de poucas espécies, como é o caso de *Actinostemon verticillatus* que concentrou a maior parte dos indivíduos amostrados.

3.2 Abertura de dossel

A análise da abertura de dossel, obtida por meio das fotografias hemisféricas, indicou uma média de abertura de 19,16% na área de restauração florestal. Os valores variaram entre as parcelas, com mínimo de 8,66% (P12) e máximo de 57,75% (P22), evidenciando a heterogeneidade da estrutura do dossel (Tabela 2). As variáveis analisadas (densidade de indivíduos regenerantes e % de abertura de dossel) não apresentaram correlação linear entre si ($p > 0,05$).

Tabela 2. Percentual de abertura de dossel (%) obtido a partir de fotografias hemisféricas em 40 parcelas amostrais na área de restauração florestal pós-mineração de bauxita.

Parcela	Abertura de dossel	Parcela	Abertura de dossel
P1	16,46	P21	42,02
P2	16,12	P22	57,75
P3	15,37	P23	28,62
P4	11,53	P24	53,26
P5	16,68	P25	15,22
P6	11,49	P26	21,24
P7	17,37	P27	15,35
P8	10,65	P28	18,19
P9	13,84	P29	10,2
P10	45,91	P30	32,02
P11	18,27	P31	32,51
P12	8,66	P32	11,83
P13	12,67	P33	9,74
P14	12,85	P34	12,84
P15	18,94	P35	11,58

P16	15,6	P36	13,26
P17	11,38	P37	15,28
P18	8,71	P38	14,12
P19	9,41	P39	14,47
P20	16,48	P40	28,51

A maior parte das parcelas apresentou valores inferiores a 20%, enquanto algumas parcelas isoladas exibiram aberturas mais elevadas, superiores a 40%, indicando a presença de clareiras ou trechos com dossel ainda pouco desenvolvido.

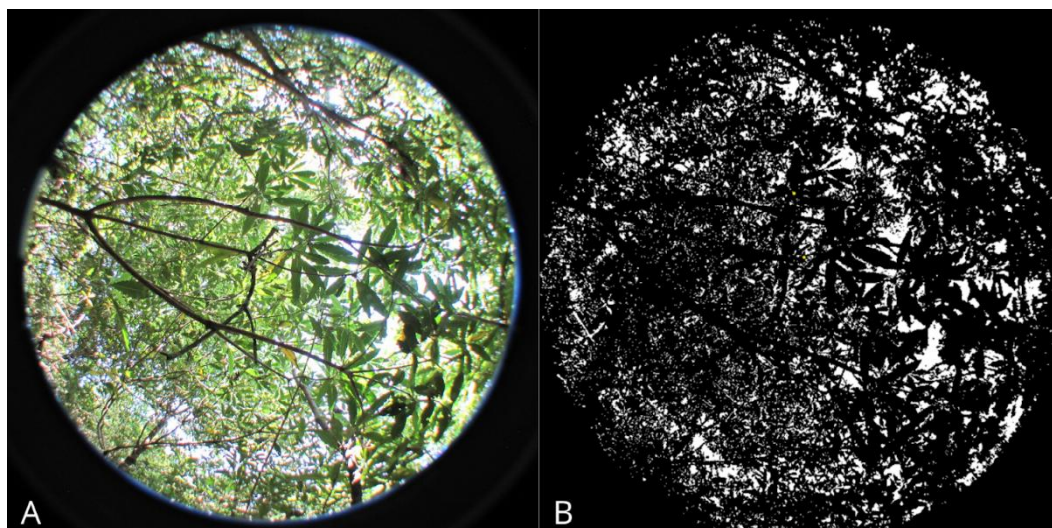


Figura 2. Fotografia do dossel obtida com adaptador fisheye (a) e imagem correspondente após processamento no software Gap Light Analyzer (GLA 2.0) (b).

4 DISCUSSÃO

A elevada abundância de *A. verticillatus* observada neste estudo está associada às características ecológicas da espécie, que apresenta grande plasticidade quanto às condições de luminosidade, ocorrendo tanto em clareiras e bordas florestais quanto no sub-bosque mais sombreado (Rabelo *et al.*, 2013). *A. verticillatus* é uma espécie nativa, que tende a ser favorecida em ambientes sob forte efeito de borda, comuns em fragmentos florestais mais estreitos ou sujeitos a perturbações (Hollunder *et al.*, 2014). Outros estudos realizados na Mata Atlântica mostram que essa espécie é uma das mais abundantes nos levantamentos florísticos, o que confirma sua capacidade de regeneração e tolerância a condições ambientais variadas (Andrade & Rodal, 2004; Hollunder *et al.*, 2014; Júnior & De Oliveira, 2012; Rocha, 2023).

Embora a área estudada seja um reflorestamento de espécies nativas de pequena extensão, ela está inserida em uma matriz florestal, situando-se entre remanescentes de florestas nativas e outras áreas com florestas restauradas. Essa característica favorece a chegada de sementes de *A. verticillatus* e de outras espécies, assim, espera-se que com o tempo ocorra um enriquecimento natural em espécies e o aumento da diversidade.

Além de suas características ecológicas, a forte predominância de *A. verticillatus* também pode estar diretamente relacionada ao histórico de restauração da área e da sua abundante ocorrência natural na região de estudo. Durante o processo de plantio, essa espécie foi introduzida em grande número, totalizando 262 indivíduos plantados em apenas 0,6 ha, o que corresponde a uma densidade inicial alta em comparação às demais espécies. Esse plantio expressivo de mudas certamente contribuiu, juntamente com a abundante dispersão da espécie, para a grande frequência de regenerantes observada na análise (Bastos *et al.*, 2025). Portanto, essa espécie apresenta potencial para uso em outros projetos de restauração pós-mineração de bauxita nessa região da Serra da Mantiqueira, onde consegue se desenvolver bem e apresentar abundante regeneração em áreas em que o solo foi muito alterado pela mineração.

Outra espécie plantada na restauração foi *Leucaena leucocephala*, uma leguminosa exótica. Cabe destacar que na época do plantio há 20 anos, pouco se sabia do potencial de invasão desta espécie, como se tem constatado nos últimos anos (Marques *et al.*, 2014; Campbell *et al.*, 2019). No plantio inicial foram plantadas 133 mudas dessa espécie, o que se refletiu na regeneração natural, onde ela se apresentou com 40

indivíduos. Esta redução no número de indivíduos da espécie pode ser atribuída ao fechamento de dossel, em que as condições de sombreamento não são favoráveis à regeneração de uma espécie heliófita como essa. Desta forma, apesar de sua presença ainda expressiva, *L. leucocephala* apresenta baixo potencial de invasão nesse fragmento, por tratar-se de uma espécie adaptada a regiões quentes, heliófita e que necessita de ambiente aberto para maior dispersão (Dhanda & Chauhan, 2022). Assim, seu desenvolvimento na área é limitado pelo microhabitat sombreado e pelas condições climáticas locais, com ocorrência frequente de geadas.

Historicamente, o plantio de espécies exóticas de rápido crescimento em áreas de restauração florestal, como *Leucaena leucocephala*, foi frequentemente justificado pela sua capacidade de promover o recobrimento rápido de solos expostos e degradados (Valpassos *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2025). Essas características são muito importantes em áreas pós-mineradas, onde acelerar o recobrimento do solo e mitigar os processos erosivos são prioridade (Viani *et al.*, 2010; Santilli & Durigan, 2014). No entanto, em áreas onde essas espécies ocorrem, torna-se fundamental a adoção de estratégias de manejo que incluam sua remoção após o cumprimento da função inicial de recobrimento, de modo a evitar sua regeneração excessiva e potenciais impactos negativos sobre a dinâmica ecológica local, além de priorização do uso de espécies nativas regionais (Silva *et al.*, 2016). No caso específico de *L. leucocephala*, o manejo adaptativo teve início após este estudo, com eliminação dos poucos indivíduos adultos ainda existentes na área.

No que diz respeito à abertura de dossel, não houve correlação significativa com os parâmetros fitossociológicos avaliados, possivelmente em função da alta variabilidade espacial da abertura de dossel entre as parcelas amostradas. Essa heterogeneidade é comum em áreas em processo de restauração, principalmente em ambientes pós-mineração, nos quais o desenvolvimento estrutural da vegetação ocorre de forma desigual ao longo do espaço (Schüler, 2016; Balestrin *et al.*, 2019). Ainda assim, a análise das fotografias hemisféricas indicou que, na maior parte das parcelas, o dossel possui um grau de fechamento considerado satisfatório para os objetivos de restauração florestal, contribuindo para a moderação das condições microclimáticas, redução da incidência direta de radiação solar e maior proteção do solo (Lenk *et al.*, 2024; Souza *et al.*, 2025).

Destaca-se que 32 das 40 parcelas avaliadas apresentaram valores de abertura de dossel inferiores a 24,54%, valor máximo registrado por Moraes *et al.* (2016) em uma floresta amazônica não explorada no estado do Pará, utilizando a mesma metodologia. Esse resultado indica que, na maior parte da área em restauração, o fechamento do dossel

já se encontra em níveis comparáveis aos observados em florestas tropicais maduras. Tal condição sugere que o dossel passou a desempenhar funções ecológicas típicas de estágios sucessionais mais avançados, criando um ambiente favorável à germinação e ao estabelecimento de espécies secundárias tardias e clímax (Suganuma et al., 2008; Nakamura et al., 2017). Nesse contexto, o dossel mais fechado pode estar contribuindo para a regeneração de espécies tolerantes ao sombreamento, como *A. verticillatus*.

Além destes padrões estruturais observados, a composição florística da regeneração natural indica outro ponto positivo para o avanço do processo de restauração. Aproximadamente 75% das espécies registradas apresentam características que as tornam atrativas à fauna (aves, morcegos e mamíferos frugívoros), como por exemplo, *Schinus terebinthifolia*, *Alchornea glandulosa*, *Cabralea canjerana*, *Casearia sylvestris* e *Eugenia uniflora*, entre outras. Essas espécies produzem recursos alimentares utilizados por animais dispersores, desempenhando um papel fundamental na dinâmica da regeneração natural (Wunderle Jr., 1997; Wang et al., 2025). A atração da fauna para a área em restauração favorece a dispersão zoocórica e promove a entrada contínua de propágulos provenientes de fragmentos de floresta nativa no entorno, ampliando a conectividade funcional da paisagem (Estrada-Villegas et al., 2023; Timmers et al., 2025). Esse fluxo de sementes contribui para o enriquecimento florístico, aumento da diversidade e substituição gradual de espécies pioneiras e generalistas por espécies de estágios sucessionais mais avançados (Scoti et al., 2011; Wendt et al., 2022).

É importante frisar que, apesar de não terem sido amostrados indivíduos regenerantes de *Araucaria angustifolia* nas parcelas avaliadas, foram observados regenerantes dessa espécie na área de estudo. Tal fato pode estar relacionado ao estágio de desenvolvimento da população, uma vez que *Araucaria angustifolia* inicia seu processo de dispersão de sementes, em geral, entre 15 e 20 anos de idade; considerando que a área possui aproximadamente 20 anos de restauração, é provável que a espécie esteja apenas no início de sua fase reprodutiva e de dispersão (Mantovani et al., 2004). Além disso, trata-se de uma espécie que não forma banco de sementes persistente no solo, pois suas sementes são recalcitrantes, apresentando curta viabilidade e rápida perda de capacidade germinativa após a dispersão, o que limita o acúmulo de propágulos e influencia diretamente o padrão de regeneração natural observado (Gasparin et al., 2020).

Em conjunto, os resultados deste estudo fornecem subsídios relevantes para o aprimoramento de práticas de implantação e manejo adaptativo da restauração florestal, ao evidenciar que decisões relacionadas à composição e à densidade inicial das espécies

plantadas podem influenciar diretamente os padrões futuros de dominância e diversidade. Além disso, os resultados reforçam a importância do manejo adaptativo de espécies exóticas presentes na área, bem como da priorização de espécies nativas regionais com atributos funcionais associados à atração de fauna. Os padrões estruturais observados, especialmente o fechamento do dossel, indicam ainda que o monitoramento contínuo da estrutura da vegetação e da regeneração natural pode subsidiar intervenções adaptativas ao longo do processo de restauração.

5 CONCLUSÕES

A análise da regeneração natural de uma área de restauração florestal pós-mineração de bauxita permitiu identificar padrões importantes de composição e estrutura da vegetação regenerante. A forte presença na área de *Actinostemon verticillatus*, espécie nativa regional, indica que o uso dessa espécie em áreas mineradas da região tende a favorecer o processo de restauração. A ocorrência da espécie exótica *Leucaena leucocephala* não apresenta potencial de invasão na área estudada, devido às condições ambientais da área, mas mesmo assim foi recomendada sua eliminação gradual.

A porcentagem de abertura de dossel não apresentou correlação significativa com os parâmetros fitossociológicos avaliados; contudo, a maior parte das parcelas amostradas apresentou níveis de fechamento do dossel considerados adequados e comparáveis aos observados em florestas tropicais maduras nativas. Além disso, a elevada proporção de espécies zoocóricas se apresentou muito positiva, evidenciando o papel da fauna na dinâmica da regeneração, trazendo propágulos de florestas nativas ao redor e criando uma conectividade entre fragmentos de diferentes estágios sucessionais. De modo geral, os resultados obtidos neste estudo indicam um desempenho positivo da área em processo de restauração.

6 REFERÊNCIAS

- Álvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Andrade, K. V. & Rodal, M. J. N. (2004). Fisionomia e estrutura de um remanescente de floresta estacional semidecidual de terras baixas no nordeste do Brasil. *Brazilian Journal of Botany*, 27, 463-474. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042004000300007>.
- APG - ANGIOSPERM PHYLOGENY GROUP IV. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. *Botanical Journal of the Linnaean Society*, v.181, p.1-20.
- Balestrin, D. M., Fonseca, S. V., Cosimo, W., Elias, L. H. (2019). Relationship between soil seed bank and canopy coverage in a mined area. *Revista Árvore*, 43(4). <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400003>.
- Balestrin, D., Martins, S. V., Fonseca, W. S. (2025). Assisted natural regeneration as a technique for restoring an area after bauxite mining, Minas Gerais, Southeast Brazil. *Revista Thema*, 24(2), 1–16. <https://doi.org/10.15536/revistathema.24.2025.3568>
- Barros, D. A. D., Guimarães, J. C. C., Pereira, J. A. A., Borges, L. A. C., Silva, R. A., Pereira, A. A. S. (2012). Characterization of the bauxite mining of the Poços de Caldas alkaline massif and its socio-environmental impacts. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 65, p.127–133. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000100018>.
- Bastin, J. F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., Crowther, T. W. (2019). The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448), 76-79. <https://doi.org/10.1126/science.aax0848>.
- Bastos, F. M., Magalhães, V. D., Kurtz, B. C. (2025). Reproductive phenology of understory species in a Semideciduous Seasonal Forest in São Pedro da Aldeia, RJ, Brazil. *Natureza Online*, 23(1), 021-024.
- Bernardinis, G. B., Cobos, M. E., Brum, F. T., Marques, M. C. M., Peterson, A. T., Carlucci, M. B., Zwiener, V. P. (2023). Ecological restoration and protection of remnants are key to the survival of the critically endangered *Araucaria* tree under climate change.

Global Ecology and Conservation, 47, e02668.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02668>.

Brancalion, P. H. S., Viani, R. A. G., Rodrigues, R. R., Gandolfi, S. (2015). Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. In: Martins SV, editor. Restauração ecológica de ecossistemas degradados. 2 nd ed. Viçosa: Editora UFV; p. 262-292.

Caldeira, M. V. W., Godinho, T. D. O., Moreira, F. L., Campanharo, Í. F., Castro, K. C., Mendonça, A. R. D., Trazzi, P. A. (2019). Litter as an ecological indicator of forest restoration processes in a dense ombrophylous lowland forest. *Floresta e Ambiente*, 26(spe1), e20180411. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.041118>.

Campbell, S. D., Vogler, W. D., Brazier, D. A., Vitelli, J. S., Brooks, S. (2019). Weed leucaena and its significance, implications and control. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 7(4), 280–289. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(7\)280-289](https://doi.org/10.17138/TGFT(7)280-289).

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Decisão de Diretoria nº 002/2024/P: proposta de diretrizes para formulação de exigências técnicas de licenças de operação relacionadas a processos de lavra e beneficiamento de empreendimentos de mineração. São Paulo: CETESB, 2024.

Cosimo, L. H. E., Martins, S. V., Gleriani, J. M. (2021). Suggesting priority areas in the buffer zone of Serra do Brigadeiro State Park for forest restoration compensatory to bauxite mining in Southeast Brazil. *Ecological Engineering*, v. 170, p. 106322. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106322>.

Crouzeilles, R., Ferreira, M. S., Chazdon, R. L., Lindenmayer, D. B., Sansevero, J. B. B., Monteiro, L., Iribarrem, A., Latawiec, A. E., Strassburg, B. B. N. (2017). Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science Advances*, 3(11), e1701345. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701345>.

Da Fonseca, D. A.; Backes, A. R.; Rosenfield, M. F.; Overbeck, G. E.; Müller, S. C. (2017). Avaliação da regeneração natural em área de restauração ecológica e mata ciliar de referência. *Ciência Florestal*, v. 27, n. 2, p. 521–534. <https://doi.org/10.5902/1980509827733>.

De Azevedo, A. D., Rocha Francelino, M., Camara, R., Gervasio Pereira, M., dos Santos Leles, P. S. (2018). Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. *Floresta*, 48(2). <https://doi.org/10.5380/rf.v48i2.54447>.

De Paula, A. S., Sfair, J. C., Trindade, D. P. F., Rito, K. F., Tabarelli, M., Barros, M. F. (2023). The role of seed rain and soil seed bank in the regeneration of a Caatinga dry forest following slash-and-burn agriculture. *Journal of Arid Environments*, 211, 104948. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104948>.

Dhanda, S., & Chauhan, B. S. (2022). Seed germination ecology of leucaena (*Leucaena leucocephala*) as influenced by various environmental parameters. *Weed Science*, 70(3), 335-340. <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.18>.

Dueñez, L. K. S., Martins, S. V., Fonseca, W. S., Corrêa, F. D. D., Abreu, A. Y. N., Cruz, Y. G. (2025). Soil seed bank as a bioindicator of compensatory forest restoration to bauxite mining, Southeast Brazil. *Revista Delos*, 18(66), e4910-e4910. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n66-149>.

Estrada-Villegas, S., Stevenson, P. R., López, O., DeWalt, S. J., Comita, L. S., Dent, D. H. (2023). Animal seed dispersal recovery during passive restoration in a forested landscape. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 378(1867), 20210076. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0076>.

Feng, D., Zhang, J., Jin, J., Luo, M., Sun, Y., Liu, C., Jin, Y., Zhu, E., Li, W. (2025). *Leucaena leucocephala* plantations can increase soil organic carbon storage by increasing labile fractions without reducing stability in dry-hot valley savannas. *Ecological Processes*, 14(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s13717-025-00656-3>.

Fengler, F. H., Bressane, A., Carvalho, M. M., Longo, R. M., de Medeiros, G. A., de Melo, W. J., Jakovac, C. C., Ribeiro, A. I. (2017). Forest restoration assessment in Brazilian Amazonia: A new clustering-based methodology considering the reference ecosystem. *Ecological Engineering*, v. 108, p.93–99. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.008>.

Fonseca, W. S., Martins, S. V., Villa, P. M. (2023) Green manure as an alternative for soil recovery in a bauxite mining environment in Southeast Brazil. *Floresta e Ambiente*, v. 30, n.1, p. e20220041. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2023-0041>.

Fonseca, W. S., Martins, S. V., Fioresi, E. M., Villa, P. M. (2024). Complementing seedling planting with nucleation techniques increases forest restoration potential in areas around bauxite mining. *Land Degradation & Development*, 35(9), 3075-3089. <https://doi.org/10.1002/ldr.5118>

Frazer, G., Canham, C., Lertzman, K. (1999). Gap Light Analyzer (GLA) (version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-color fisheye photographs [software]. <https://www.caryinstitute.org/science/our-scientists/dr-charles-d-canham/gap-light-analyzer-gla>.

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration (Second edition). *Restoration Ecology*, 27(S1), S3–S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>.

Gasparin, E., Faria, J. M. R., José, A. C., Tonetti, O. A. O., Melo, R. A. de; Hilhorst, H. W. M. (2020). Viability of recalcitrant *Araucaria angustifolia* seeds in storage and in a soil seed bank. *Journal of Forestry Research*, v. 31, p. 2413–2422. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01001-z>.

Hollunder, R. K., Martins, K. G. G., Lubner, J., Souza, R., Ferreira, T. T. C., de Sá Mendonça, E., Garbin, M. L.(2014). Associação entre espécies de sub-bosque e variação topográfica em um fragmento de Floresta Atlântica no Estado do Espírito Santo. *Acta Scientiae & Technicae*, v. 2, n. 2, p. 35-41.

IBGE (2012). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico da Vegetação Brasileira. 2 ed. Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro: IBGE, 2012, 276 p.

Júnior, M., & De Oliveira, J. (2012). Composição florística e análise estrutural do componente arbóreo do Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

Kamble, P. H. & Bhosale, S. M. (2019). Assessment of Impact of Bauxite Mining on Environment. *i-Manager's Journal on Future Engineering and Technology*. 14(4):14-21. <https://doi.org/10.26634/jfet.14.4.16069>.

Lenk, A.; Richter, R.; Kretz, L.; Wirth, C. (2024). Effects of canopy gaps on microclimate, soil biological activity and their relationship in a European mixed floodplain forest. *Science of The Total Environment*, 941, 173572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173572>.

Liu, J. (2025). Progress in research on the effects of environmental factors on natural forest regeneration. *Frontiers in Forests and Global Change*, 8, 1525461. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.1525461>.

Mantovani, A.; Morellato, L. P. C.; Reis, M. S. (2004). Fenologia reprodutiva e produção de sementes de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. *Revista Brasileira de Botânica*, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 787–796.

Marques, A. R., Costa, C. F., Atman, A. P. F., Garcia, Q. S. (2014) Germination characteristics and seedbank of the alien species *Leucaena leucocephala* (Fabaceae) in Brazilian forest: ecological implications. *Weed Research*, v. 54, n. 6, p. 576-583. <https://doi.org/10.1111/wre.12107>.

Martins, S. V, Cosimo, L. H. E, Balestrin, D., Fonseca, W. S., Andrade, C. F., Barros, R. S. (2020). Restoration of Tree and Shrub Diversity Post Bauxite Mining, in the Southeastern Region of Minas Gerais, Brazil. In: Kristian de Vlieger. (Org.). *Recent Advances in Ecological Restoration*. 1ed.Estados Unidos: Nova, v.1, p. 33-62.

Nakamura, A., Kitching, R. L., Cao, M., Creedy, T. J., Fayle, T. M., Freiberg, M., Hewitt, C. N., Itioka, T., Koh, L. P., Ma, K., Malhi, Y., Mitchell, A., Novotny, V., Ozanne, C. M. P., Song, L., Wang, H., & Ashton, L. A. (2017). Forests and their canopies: achievements and horizons in canopy science. *Trends in Ecology & Evolution*, 32(6), 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.02.020>.

Oliveira, R. E. de, & Engel, V. L. (2018). Indicadores de monitoramento da restauração na Floresta Atlântica e atributos para ecossistemas restaurados. *Scientia Plena*, 13(12). <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2017.127301>

Oliveira, M.E.A, Martins, S.V., Kettenhuber, P.L.W., Oliveira, D.A.S., Villa, P.M. (2025). Seed bank taxonomic diversity and functional composition in an area undergoing forest restoration in Brumadinho, Brazil. *Ecological Restoration*, 43(3), 183-194. <https://doi.org/10.3368/er.43.3.183>

Piaia, B. B., Rovedder, A. P. M., Procknow, D., Camargo, B., Gazzola, M. D., Croda, J. P., de Moraes Stefanello, M. (2020). Natural regeneration as an indicator of ecological restoration by applied nucleation and passive restoration. *Ecological Engineering*, 157, 105991. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105991>.

Quinteiro, M. M. D. C., Alexandre, B. D. R., Magalhães, L. M. S. (2019). Brazilian pine (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze) ethnoecology in the mantiqueira atlantic forest. *Floresta e Ambiente*, 26(1), e20160185. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.018516>.

Rabelo, G. R., Vitória, Â. P., da Silva, M. V. A., Alcántara-de la Cruz, R., Pinho, E. I. B., Ribeiro, D. R., Freitas, A. V., da Cunha, M. (2013). Structural and ecophysiological adaptations to forest gaps. *Trees*, 27, 259–272. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0796-2>.

Rocha, S. A. (2023). Composição, estrutura e regeneração de um trecho de floresta ripária estacional semidecidual, Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Volta Redonda, RJ.

Rodríguez-Uña, A., Cruz-Alonso, V., Rohrer, Z., Martínez-Baroja, L. (2020). Fresh perspectives for classic forest restoration challenges. *Restoration Ecology*. 28(1): 12-15. <https://doi.org/10.1111/rec.13093>.

Suganuma, S., Domingues Torezan, J. M., Cavalheiro, A. L., Laforga Vanzela, A. L., & Benato, T. (2008). Comparando metodologias para avaliar a cobertura do dossel e a luminosidade no sub-bosque de um reflorestamento e uma floresta madura. *Revista Árvore*, 32(2), 377–385. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000200020>.

Santilli, C. & Durigan, G. (2014). Do alien species dominate plant communities undergoing restoration? A case study in the Brazilian savanna. *Scientia Forestalis* 2014; 42(103): 371-382.

Schüler, J. (2016). Avaliação da abertura de dossel e de seus efeitos sobre a regeneração natural em áreas de restauração florestal. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) – apresentado conforme as normas técnicas da Revista Brasileira de Biociências.

Scototi, M. S. V., Araujo, M. M., Wendler, C. F., Longhi, S. J. (2011). Mecanismos de regeneração natural em remanescente de Floresta Estacional Decidual. *Ciência Florestal*, 21(3), 459-472. <https://doi.org/10.5902/198050983803>.

Shepherd, G. J. Fitopac 2.1: programa para análise de dados fitossociológicos. Departamento de Botânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2010.

Sgarlata, G. M., Maié, T., de Zoeten, T., Rasteiro, R., Chikhi, L. (2022). On the genetic consequences of habitat contraction: edge effects and habitat loss. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.10.25.513679>.

Silva, K. A., Martins, S. V., Neto, A. M., Demolinari, R. A., Lopes, A. T. (2016). Restauração florestal de uma mina de bauxita: Avaliação do desenvolvimento das espécies arbóreas plantadas. *Floresta e Ambiente*, 23(3), 309–319. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.142515>.

Silva, K.A, Martins, S. V., & Neto, A. M. (2020). Influence of Environmental Variables on the Natural Regeneration of a Forest under Restoration after Bauxite Mining and in a

Reference Ecosystem in Southeastern Brazil. *Research in Ecology*, 2(4), 1-11. <https://doi.org/10.30564/re.v2i4.2609>.

Song, G. Z. M., Chao, K. J., Doley, D., Fukuda, S., Wang, W., & Robinson, D. E. (2018). Sky-canopy border length, exposure and thresholding influence accuracy of hemispherical photography for complex plant canopies. *Botanical Studies*, 59, 19. <https://doi.org/10.1186/s40529-018-0235-9>.

Souza, K. M., Candido, L. A., Corrêa, P. B., Monte, M. J. de M., Ramos, W. M. P., Timóteo, G. G. (2025). Análise do efeito de amortecimento do microclima da floresta de sub-bosque da Reserva Florestal Adolpho Ducke na Amazônia Central. *Revista Brasileira de Climatologia*, 37(21), 330–359. <https://doi.org/10.55761/abclima.v37i21.19670>.

Stuble, K. L., Fick, S. E., Young, T. P. (2017). Every restoration is unique: testing year effects and site effects as drivers of initial restoration trajectories. *Journal of Applied Ecology*, 54(4), 1051-1057. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12861>.

Timmers, R., Côrtes, M. C., van Kuijk, M., Canassa, G. G., Staneke, R., Rosin, F. S., Van Hooff, M. p. j., Knuit, J. J. H., Pires, M. M., Soons, M. B. (2025). Landscape-scale forest cover shapes the complexity of seed-dispersal networks in regenerating forest fragments. *Biological Conservation*, 309, 111312. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111312>.

UNGA (Assembléia Geral das Nações Unidas). (2019). Década das Nações Unidas sobre Restauração de Ecossistemas (2021-2030). Documento da ONU A / RES / 73/284 (6 de agosto de 2020).

Valpassos, M. A. R., Maltoni, K. L., Cassiolato, A. M. R., Nahas, E. (2007). Recovery of soil microbiological properties in a degraded area planted with *Corymbia citriodora* and *Leucaena leucocephala*. *Scientia Agricola*, 64, 68-72. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000100010>.

Viani, R. A., Barreto, T. E., Farah, F. T., Rodrigues, R. R., Brancalion, P. H. (2018). Monitoring young tropical forest restoration sites: how much to measure? *Tropical Conservation Science*, 11, 1940082918780916. <https://doi.org/10.1177/1940082918780916>.

- Viani, R. A. G, Durigan, G., Melo, A. C. G. (2010). A regeneração natural sob plantações florestais: desertos verdes ou redutos de biodiversidade? *Ciência Florestal*; 20(3): 533-552. <http://dx.doi.org/10.5902/198050982067>.
- Wang, X., Zhang, L., Huo, X., Zhang, G., Yu, F. (2025). Reduced rodent-mediated seed dispersal at forest edge hinders regeneration. *Global Ecology and Conservation*, 59, e03571. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2025.e03571>.
- Wendt, A. L., Chazdon, R. L., Vargas Ramirez, O. (2022). Successional trajectories of seed dispersal mode and seed size of canopy tree species in wet tropical forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 946541. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.946541>.
- Wunderle Jr, J. M. (1997). The role of animal seed dispersal in accelerating native forest regeneration on degraded tropical lands. *Forest ecology and management*, 99(1-2), 223-235. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00208-9).
- Zangalli, C., Fockink, G. D., de Almeida, B. R. S., de Oliveira, E., de Goes, M. P., Nicoletti, M. F., Floriani, M. M. P., Kanieski, M. R. (2023). Ecological indicators of forest regeneration in areas of Araucaria Forest in South Brazil. *Ecological Engineering*, 194, 107035. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107035>.

Capítulo 2: Banco de sementes do solo de uma área em restauração pós-mineração de bauxita, Águas da Prata-SP, Sudeste do Brasil

Resumo

A região da Serra da Mantiqueira na divisa dos estados de São Paulo e Minas Gerais, passou por um processo histórico de fragmentação florestal para agricultura e pecuária. O sucesso da restauração florestal dessas áreas depende da avaliação e monitoramento dos projetos. Entre os indicadores utilizados, o banco de sementes do solo se destaca por indicar o potencial de regeneração e a trajetória sucessional. Assim, este estudo avaliou a composição, densidade e diversidade do banco de sementes do solo em uma área minerada em processo de restauração há 20 anos. O estudo foi conduzido em uma área de restauração florestal pós-mineração de bauxita, com 0,6 ha, no município de Águas da Prata, São Paulo, Brasil. A área foi dividida em 40 parcelas de 2x2 m e em cada uma delas foi retirada uma amostra de solo para representar o banco de sementes. O monitoramento do banco de sementes foi realizado durante nove meses, período em que todas as plântulas emergidas foram contadas e identificadas. Foram estimados os parâmetros fitossociológicos, incluindo frequência relativa, densidade relativa e dominância relativa, bem como os índices de diversidade de Shannon-Wiener e de equabilidade de Pielou. Foram registrados 3.618 indivíduos, distribuídos em 68 espécies e 28 famílias, majoritariamente composta por herbáceas, sendo identificadas 12 espécies arbóreas. O Índice de Shannon foi de 3,03 e a Equabilidade de 0,72. Os resultados indicam que a área que passou por mineração de bauxita, após 20 anos de restauração florestal, apresenta trajetória sucessional positiva, evidenciada pela elevada diversidade, riqueza e densidade do banco de sementes do solo, associadas à baixa dominância ecológica. A predominância de espécies pioneiras e a presença de espécies arbóreas nativas dispersas pela fauna sugerem a ocorrência de processos ecológicos relevantes, como colonização inicial, fluxo de propágulos e conectividade com fragmentos florestais adjacentes.

Palavras-chave: Ecologia de sementes, sucessão ecológica, Serra da Mantiqueira.

Abstract

The Serra da Mantiqueira region, on the border between the states of São Paulo and Minas Gerais, has undergone a historical process of forest fragmentation due to agriculture and livestock farming, and to a lesser extent bauxite mining. The success of forest restoration in these areas depends on the evaluation and monitoring of restoration projects. Among the indicators used, the soil seed bank stands out for indicating regeneration potential and successional trajectory. Thus, this study evaluated the composition, density, and diversity of the soil seed bank in a mined area undergoing restoration for 20 years. The study was conducted in a post-bauxite-mining forest restoration area of 0.6 ha, in the municipality of Águas da Prata, São Paulo, Brazil. The area was divided into 40 plots of 2×2 m, and a soil sample was collected from each plot to assess the seed bank. Monitoring of the seed bank was carried out over nine months, during which all emerged seedlings were counted and identified. Phytosociological parameters were estimated, including relative frequency, relative density, and relative dominance, as well as the Shannon–Wiener diversity index and Pielou’s evenness index. A total of 3,618 individuals were recorded, distributed among 68 species and 28 families, predominantly herbaceous, with 12 tree species identified. The Shannon index was 3.03 and evenness was 0.72. The results indicate that the post-bauxite-mining area, after 20 years of forest restoration, shows a positive successional trajectory, evidenced by high diversity, richness, and density of the soil seed bank, associated with low ecological dominance. The predominance of pioneer species and the presence of native tree species dispersed by fauna suggest the occurrence of relevant ecological processes, such as initial colonization, propagule flow, and connectivity with adjacent forest fragments.

Keywords: Seed ecology; ecological succession; Serra da Mantiqueira.

1 INTRODUÇÃO

A Serra da Mantiqueira constitui um dos mais importantes conjuntos montanhosos do sudeste brasileiro, inserido no bioma Mata Atlântica, reconhecido mundialmente por sua elevada biodiversidade e altos níveis de endemismo (Neves *et al.*, 2017; Gonzaga *et al.*, 2020; Andrade *et al.*, 2023). As variações altitudinais, climáticas e edáficas características dessa região garantem um ambiente heterogêneo, favorecendo a ocorrência de diferentes formações florestais e grande número de espécies vegetais adaptadas a condições ambientais específicas (Furtado & Neto, 2018; Gonzaga & Menini Neto, 2019). No entanto, apesar de sua relevância ecológica, a Serra da Mantiqueira tem sido historicamente submetida a intensas pressões antrópicas, resultantes da expansão de atividades como agricultura, urbanização e desmatamento, o que tem contribuído para a degradação e fragmentação desse ecossistema (Silva *et al.*, 2021; Vilanova, 2025).

Dentre as formações florestais que compõem a Serra da Mantiqueira, está a Floresta Ombrófila Mista, onde ocorre naturalmente a espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, de grande importância ecológica, histórica e cultural para a região (Reis *et al.*, 2018; Souza, 2021). A araucária tem um papel fundamental na estrutura e no funcionamento desses ecossistemas, contribuindo para a manutenção da biodiversidade e para a oferta de recursos alimentares à fauna (Marini *et al.*, 2010; Bogoni *et al.*, 2016). No entanto, a intensa exploração madeireira ocorrida ao longo do século XX, juntamente com a conversão de áreas florestais para outros usos do solo, resultou em uma drástica redução de sua área de distribuição natural, levando a espécie a ser considerada criticamente em perigo pela IUCN (Thomas 2013; Matos *et al.*, 2016; Nodari, 2016).

Dessa forma, é clara a necessidade de conservação e restauração dos ecossistemas florestais da Serra da Mantiqueira diante da intensificação de atividades antrópicas (Pompeu *et al.*, 2018). Nessa serra são encontrados inúmeros corpos de minério de bauxita, cuja mineração sustentável gera empregos diretos e indiretos, e benefícios econômicos para os municípios da região. Essa atividade caracteriza-se, de modo geral, pela remoção da camada mais superficial do solo, onde o minério se encontra concentrado, sendo frequentemente considerada menos invasiva quando comparada a outros tipos de exploração mineral (Balestrin *et al.*, 2020; Martins *et al.*, 2020; Melo & Sánchez; 2020). No entanto, apesar de sua menor profundidade, a mineração de bauxita

promove alterações no meio ambiente, necessitando de intervenção para restabelecer o equilíbrio ecológico (Gann *et al* 2019; Rodríguez Uña *et al.*, 2020).

Neste contexto, a CBA – Companhia Brasileira de Alumínio - têm desenvolvido programas de restauração que visam à recomposição da cobertura vegetal e retorno dos processos ecológicos naturais após o encerramento das atividades de extração (Silva *et al.*, 2016; Balestrin *et al.*, 2025). Essas iniciativas geralmente incluem a reconformação topográfica, a transposição do *topsoil* previamente removido, o plantio de mudas de espécies nativas e o monitoramento da vegetação e da fauna ao longo do tempo (Martins *et al.*, 2020). Considerando que cada área a ser restaurada apresenta suas particularidades ecológicas, utilizar bioindicadores do próprio local pode auxiliar na construção de uma restauração florestal mais assertiva (Martins, 2018).

A utilização de bioindicadores ecológicos tem se mostrado um parâmetro satisfatório para avaliar processos de restauração florestal (Oliveira & Engel, 2018). Esses indicadores funcionam como ferramentas capazes de revelar o grau de conservação dos ecossistemas, uma vez que respondem de forma sensível às mudanças ambientais (Brancalion *et al.*, 2015). Nesse contexto, diferentes atributos podem ser analisados, como a regeneração natural da vegetação, a abertura de dossel, a produção de serapilheira e o banco de sementes do solo (Santos *et al.*, 2021; Ronquim *et al.*, 2024; Cardozo *et al.*, 2025). A análise integrada desses atributos permite entender a dinâmica entre o ambiente, a flora, a fauna e o solo, possibilitando identificar o estágio de desenvolvimento da restauração florestal e orientar estratégias mais assertivas para conduzir o ecossistema a um estado de maior equilíbrio ambiental (Martins, 2018; Brancalion *et al.*, 2015).

O banco de sementes do solo é um dos componentes mais relevantes no processo de regeneração florestal, principalmente em áreas alteradas (Silva *et al.*, 2019; Adjalla *et al.*, 2022; Dueñez *et al.*, 2025). Esse compartimento é formado por sementes viáveis, predominantemente ortodoxas, presentes no solo e em sua camada superficial, que podem permanecer dormentes por longos períodos (Martins *et al.*, 2015; Benítez-Malvido, 2023). A análise do banco de sementes do solo fornece informações importantes sobre o potencial de regeneração da área, como a presença de espécies não observadas no povoamento florestal atual, indicando a entrada de propágulos provenientes de fontes externas, dispersos pelo vento ou transportados por animais (Oliveira *et al.*, 2024). Além disso, o banco de sementes do solo permite inferir a composição de espécies que tendem a se estabelecer nas etapas seguintes da sucessão ecológica, assim como identificar a

ocorrência de espécies invasoras, que podem comprometer o processo de restauração e demandar ações de controle (Zylberberg *et al.*, 2024; Dueñez *et al.*, 2025)

Sendo assim, este estudo teve como objetivo principal avaliar o banco de sementes do solo em uma área submetida à mineração de bauxita e em processo de restauração florestal há 20 anos. A partir da análise da riqueza de espécies, da densidade e da diversidade do banco de sementes do solo, buscou-se inferir o estado atual da restauração florestal e compreender a trajetória da sucessão ecológica na área de estudo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em uma área de 0,6 ha, denominada Quirinos, pertencente à Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), localizada no município de Águas da Prata, estado de São Paulo, Sudeste do Brasil (Fig. 1). A área passou por mineração de bauxita e, após a interrupção das atividades em 2005, iniciou-se um processo de restauração ecológica conduzido pela CBA. Atualmente, a área encontra-se em processo de restauração há aproximadamente 20 anos, apresentando cobertura florestal secundária em estágio intermediário de desenvolvimento.

O clima regional é classificado como Cwa, segundo Köppen, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos secos e amenos (Alvares *et al.*, 2013). A área de estudo está inserida em uma paisagem heterogênea, composta por áreas em diferentes estágios de restauração, fragmentos de floresta nativa, plantios de eucalipto, pastagens e áreas de extração de bauxita e situa-se a 1.403 m de altitude.

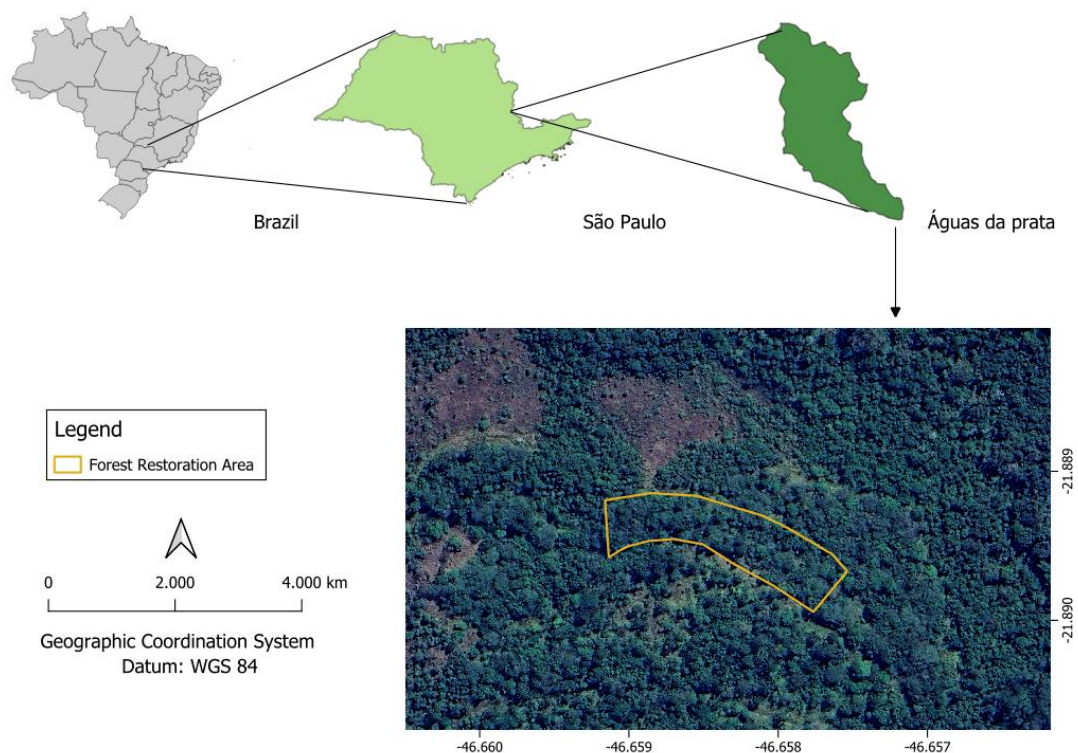


Figura 1: Mapa de localização da área de restauração estudada em Águas da Prata, SP.

2.2 Amostragem

Para garantir uma amostragem representativa do banco de sementes do solo, foram estabelecidas duas linhas de amostragem no interior da área de estudo, posicionadas a 14 m de distância entre si. Ao longo de cada linha, foram demarcadas 20 parcelas de 2×2 m, totalizando 40 parcelas. As parcelas foram dispostas com espaçamento regular de 8 m entre si e 5 m das bordas da área, assegurando uma cobertura uniforme da área (Fig.2).



Figura 2. Coleta do banco de sementes na floresta em restauração, Águas da Prata, SP.

Cada parcela foi marcada com estacas de madeira e delimitada com o auxílio de gabaritos de bambu, de forma a padronizar o tamanho das unidades amostrais. Em cada parcela foi coletada uma amostra de solo representativa do banco de sementes. Para isso, inicialmente foi removida a camada de serapilheira grossa superficial, seguida da coleta do solo até a profundidade de 6,0 cm com uma bandeja de 27 x 20,5 x 6 cm, utilizada como referência volumétrica, por corresponder à camada onde se concentra a maior densidade de sementes viáveis no solo. O solo foi retirado com o auxílio de uma pá, depositado em sacos plásticos previamente identificados e posteriormente transportado para estufa do Laboratório de Restauração Florestal (LARF) no Viveiro de Pesquisa da Universidade Federal de Viçosa.

A coleta foi feita no mês de janeiro (verão) e a metodologia adotada seguiu protocolos comumente aplicados em estudos sobre o banco de sementes do solo em Floresta Estacional Semidecidual em Minas Gerais (Balestrin *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2021; Fonseca *et al.*, 2024). No viveiro, as amostras de solo coletadas foram acondicionadas nas bandejas plásticas (27 × 20,5 × 6 cm) e dispostas em casa de

vegetação equipada com tela de sombreamento de 50% e irrigação automatizada, com aspersores acionados três vezes ao dia. Para evitar vieses relacionados à posição, as 40 bandejas foram alocadas em bancadas em ordem aleatória. O monitoramento do banco de sementes foi realizado durante nove meses, período em que todas as plântulas emergidas foram contadas e identificadas. O procedimento adotado seguiu o método de emergência de plântulas utilizado em estudos de banco de sementes, conforme descrito por Ter Heerdt *et al.* (1996).

A identificação taxonômica das espécies seguiu o sistema Angiosperm Phylogeny Group IV (APG IV, 2016). A atualização e conferência da nomenclatura botânica foram realizadas a partir da Lista de Espécies da Flora do Brasil. Além disso, as espécies registradas foram categorizadas quanto à origem biogeográfica (nativas ou exóticas) e quanto à forma de vida (arbóreas, arbustivas, herbáceas ou trepadeiras), de acordo com informações disponíveis no Re flora (2024) e literatura disponível.

2.3 Análise de dados

Os dados provenientes das 40 parcelas foram empregados para descrever a composição florística e a estrutura do banco de sementes da área de estudo. A partir dessas informações, foram estimados os parâmetros fitossociológicos, incluindo frequência relativa e densidade relativa, bem como os índices de diversidade de Shannon-Wiener e de equabilidade de Pielou. Todas as análises foram realizadas com o auxílio do software Fitopac 2.1 (Shepherd, 2010), adotando-se os mesmos critérios metodológicos aplicados na análise da regeneração natural, de modo a permitir comparações entre os compartimentos da vegetação.

3 RESULTADOS

3.1 Fitossociologia do banco de sementes do solo

A partir do acompanhamento do banco de sementes do solo, foram registrados 3.618 indivíduos, distribuídos em 68 espécies pertencentes a 28 famílias botânicas (Tabela 1). Observou-se o predomínio de espécies nativas (Figura 3), que corresponderam à quase totalidade da riqueza registrada, enquanto apenas quatro espécies foram classificadas como exóticas, representando aproximadamente 5,9 % do total de espécies. Quanto ao hábito de vida, a comunidade foi majoritariamente composta por espécies herbáceas e arbustivas, sendo identificadas também 12 espécies arbóreas.



Figura 3. À esquerda, emergência de plântulas de espécies nativas do banco de sementes, à direita detalhe de pinhões não germinados de *A. angustifolia*. Estufa LARF, viveiro UFV.

Tabela 1. Fitossociologia das espécies identificadas no banco de sementes do solo, no município de Águas da Prata, SP, Brasil.

Espécies	Nº ind	DR	FR	Origem	Hábito	G. Eco	Dispersão
Amaranthaceae							
<i>Alternanthera flavescens</i> Kunth.	33	0,91	1,51	nativa	herbácea	P	ANE
Asteraceae							
<i>Achyrocline satureioides</i> (Lam.) DC.	17	0,47	1,96	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Ageratum conyzoides</i> L.	281	7,77	4,07	nativa	herbácea	P	ZOO
<i>Ageratum houstonianum</i> Mill.	7	0,19	0,3	exótica	herbácea	P	ZOO
<i>Baccharis dracunculifolia</i> DC.	209	5,78	5,88	nativa	arbustiva	P	ANE
<i>Baccharis trimera</i> (Less.) DC.	2	0,06	0,3	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Baccharis trinervis</i> Pers.	24	0,66	1,21	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Bidens pilosa</i> L.	28	0,77	0,45	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Chromolaena odorata</i> (L.) R.M.King & H.Rob.	16	0,44	1,21	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Conyza bonariensis</i> (L.) Cronquist	13	0,36	1,81	nativa	arbustiva	P	ANE
<i>Emilia fosbergii</i> Nicolson	13	0,36	1,36	natur.	herbácea	P	ANE
<i>Erechtites valerianifolius</i> (Link ex Spreng.) DC.	2	0,06	0,3	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Galinsoga quadriradiata</i> Ruiz & Pav.	5	0,14	0,3	natur.	herbácea	P	ANE
<i>Gamochaeta americana</i> (Mill.) Wedd.	17	0,47	1,21	nativa	herbácea	SI	ANE
<i>Mikania micrantha</i> Kunth	4	0,11	0,3	nativa	trepadeira	P	ANE
<i>Pluchea sagittalis</i> (Lam.) Cabrera	6	0,17	0,45	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Vernonanthura polyanthes</i> (Sprengel) Vega & Dematteis	67	1,85	3,92	nativa	arbustiva	P	ANE
Campanulaceae							
<i>Wahlenbergia marginata</i> (Thunb.) A.DC.	1	0,03	0,15	nativa	herbácea	P	ANE

Cannabaceae

<i>Trema micranthum</i> (L.) Blume	5	0,14	0,6	nativa	arbórea	P	ZOO
------------------------------------	---	------	-----	--------	---------	---	-----

Commelinaceae

<i>Gibasis geniculata</i> (Jacq.) Rohweder	4	0,11	0,45	nativa	herbácea	P	ZOO
--	---	------	------	--------	----------	---	-----

<i>Commelina erecta</i> L.	3	0,08	0,15	nativa	herbácea	P	AUTO
----------------------------	---	------	------	--------	----------	---	------

Convolvulaceae

<i>Ipomoea hederifolia</i> L.	8	0,22	1,06	nativa	trepadeira	P	ANE
-------------------------------	---	------	------	--------	------------	---	-----

<i>Ipomoea triloba</i> L.	8	0,22	0,99	nativa	trepadeira	P	ANE
---------------------------	---	------	------	--------	------------	---	-----

Cucurbitaceae

<i>Momordica charantia</i> L.	2	0,06	0,3	natur.	trepadeira	P	ZOO
-------------------------------	---	------	-----	--------	------------	---	-----

Cyperaceae

<i>Fimbristylis dichotoma</i> (L.) Vahl	9	0,25	1,21	nativa	herbácea	P	AUTO
---	---	------	------	--------	----------	---	------

<i>Scleria gaertneri</i> Raddi	952	26,31	6,03	nativa	herbácea	NC	AUTO
--------------------------------	-----	-------	------	--------	----------	----	------

Euphorbiaceae

<i>Actinostemon verticillatus</i> (Klotzsch) Baill.	40	1,11	1,96	nativa	arbórea	SI	AUTO
---	----	------	------	--------	---------	----	------

<i>Croton floribundus</i> Spreng.	48	1,33	2,41	nativa	arbórea	P	AUTO
-----------------------------------	----	------	------	--------	---------	---	------

<i>Croton urucurana</i> Baill.	47	1,3	2,87	nativa	arbórea	P	ZOO
--------------------------------	----	-----	------	--------	---------	---	-----

<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	2	0,06	0,3	nativa	arbórea	P	ZOO
---------------------------------------	---	------	-----	--------	---------	---	-----

Fabaceae

<i>Centrosema pubescens</i> Benth.	8	0,22	0,9	nativa	trepadeira	P	AUTO
------------------------------------	---	------	-----	--------	------------	---	------

<i>Crotalaria incana</i> L.	17	0,47	1,36	nativa	arbustiva	P	AUTO
-----------------------------	----	------	------	--------	-----------	---	------

<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	18	0,5	0,9	exótica	arbórea	P	AUTO
--	----	-----	-----	---------	---------	---	------

<i>Mimosa scabrella</i> Bench.	28	0,77	0,6	nativa	arbórea	P	AUTO
--------------------------------	----	------	-----	--------	---------	---	------

<i>Senna</i> sp.	1	0,03	0,15	nativa	herbácea	P	AUTO
------------------	---	------	------	--------	----------	---	------

Lamiaceae

<i>Salvia guaranitica</i> A. St. - Hil. ex Benth	6	0,17	0,75	nativa	arbustiva	NC	AUTO
Loganiaceae							
<i>Spigelia anthelmia</i> L.	16	0,44	0,6	nativa	herbácea	P	AUTO
Malvaceae							
<i>Sida rhombifolia</i> L.	161	4,45	4,68	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Sida urens</i> L.	10	0,28	0,45	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Triumfetta semitriloba</i> Jacq.	295	8,15	5,13	nativa	arbustiva	P	ZOO
<i>Wissadula hernandioides</i> (L. Hér.) Garcke sp.	7	0,19	0,3	nativa	arbustiva	P	AUTO
Moraceae							
<i>Maclura tinctoria</i> (L.) D.Don ex Steud.	1	0,03	0,15	nativa	arbórea	SI	ZOO
Oxalidaceae							
<i>Oxalis corniculata</i> L.	82	2,27	3,47	natur.	herbácea	P	ANE
Phyllanthaceae							
<i>Phyllanthus tenellus</i> Roxb.L.	123	3,4	2,87	nativa	herbácea	SI	AUTO
Piperaceae							
<i>Piper umbellatum</i> L.	21	0,58	0,6	nativa	arbustiva	P	ZOO
Plantaginaceae							
<i>Stemodia verticillata</i> (Mill.) Hassl.	71	1,96	1,21	nativa	herbácea	P	AUTO
Poaceae							
<i>Digitaria</i> sp.	1	0,03	0,15	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Melinis minutiflora</i> P.Beauv.	40	1,11	2,26	natur.	herbácea	P	ANE
<i>Oplismenus hirtellus</i> (L.) P.Beauv.	3	0,08	0,45	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Urochloa decumbens</i> (Stapf) R.D.Webster	137	3,79	3,02	exótica	herbácea	P	ANE
Rosaceae							
<i>Rubus rosifolius</i> Sm.	264	7,3	4,68	natur.	arbustiva	ST	ZOO

Rubiaceae

<i>Borreria latifolia</i> (Aubl.) K.Schum.	18	0,5	0,75	nativa	herbácea	SI	AUTO
<i>Borreria verticillata</i> (L.) G.Mey.	16	0,44	0,75	nativa	arbustiva	P	AUTO
<i>Richardia brasiliensis</i> Gomes	49	1,35	1,81	nativa	herbácea	P	ANE

Rutaceae

<i>Zanthoxylum rhoifolium</i> Lam.	3	0,08	0,45	nativa	arbórea	P	ZOO
------------------------------------	---	------	------	--------	---------	---	-----

Sapindaceae

<i>Matayba elaeagnoides</i> Radlk.	1	0,03	0,15	nativa	arbórea	ST	ZOO
------------------------------------	---	------	------	--------	---------	----	-----

Scrophulariaceae

<i>Buddleja stachyoides</i> Cham. & Schltdl.	1	0,03	0,15	nativa	arbustiva	P	ANE
--	---	------	------	--------	-----------	---	-----

Solanaceae

<i>Nicandra physalodes</i> (L.) Gaertn.	39	1,08	2,41	natur.	arbustiva	P	AUTO
<i>Physalis peruviana</i> L.	5	0,14	0,3	natur.	arbustiva	P	ZOO
<i>Solanum aculeatissimum</i> Jacq.	1	0,03	0,15	nativa	arbustiva	P	ZOO
<i>Solanum americanum</i> Mill.	32	0,88	2,56	nativa	herbácea	P	ZOO
<i>Solanum mauritianum</i> Scop.	24	0,66	2,26	nativa	arbórea	P	ZOO

Urticaceae

<i>Boehmeria nivea</i> (L.) Gaudich.	3	0,08	0,15	exótica	arbustiva	P	ZOO
<i>Boehmeria cylindrica</i> (L.) Sw.	89	2,46	2,11	nativa	arbustiva	P	ZOO
<i>Cecropia glaziovii</i> Snethl.	10	0,28	1,06	nativa	arbórea	P	ZOO

Verbenaceae

<i>Lantana camara</i> L.	65	1,8	3,02	natur.	arbustiva	P	ZOO
<i>Stachytarpheta cayennensis</i> (Rich.) Vahl	71	1,96	1,66	nativa	herbácea	P	ANE
<i>Verbena litoralis</i> (Moldenke) N.O'Leary	8	0,22	0,6	nativa	herbácea	P	AUTO

Em que: N° ind: número de indivíduo; DR: densidade relativa; FR: frequência relativa; G. Eco: grupo ecológico; natur: naturalizada; zoo: zoocórica; ane: anemocórica; auto: autocórica

No banco de sementes do solo, a família Cyperaceae apresentou o maior número de indivíduos (961), seguida por Asteraceae (711), Malvaceae (473) e Rosaceae (264). Entre as espécies registradas, *Scleria gaertneri* foi a mais abundante, com 952 indivíduos, seguida por *Triumfetta semitriloba* (295), *Ageratum conyzoides* (281) e *Rubus rosifolius* (264). A densidade de propágulos estimada foi de 1.675 propágulos m⁻². Em relação aos índices de diversidade, o Índice de Shannon-Wiener (H') apresentou valor de 3,03, e o Índice de Equabilidade de Pielou (J') foi de 0,717.

4 DISCUSSÃO

Os resultados da avaliação do banco de sementes do solo obtidos neste estudo mostram boa diversidade de espécies ($H' = 3,15$) quando comparados a outros trabalhos realizados em áreas restauradas após mineração, além de indicarem baixa dominância ecológica, refletida pelo alto valor de equabilidade ($J' = 0,715$) (Miranda Neto, 2017; Balestrin *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2021; Dueñez, 2025; Oliveira *et al.*, 2025). A riqueza registrada (68 espécies) também foi superior à observada em estudos conduzidos em áreas de Mata Atlântica em diferentes contextos de restauração (Balestrin *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2021; Brumatti *et al.*, 2023; Dueñez, 2025). A alta densidade de propágulos (1.675 propágulos m^{-2}) pode ser atribuída à alta incidência de espécies pioneiras, que apresentam estratégias de dormência que favorecem a formação de bancos de sementes persistentes, aproximando-se dos valores médios de densidade reportados para florestas tropicais (Garwood, 1989).

É comum em estudos sobre banco de sementes do solo em áreas perturbadas a elevada representatividade de espécies herbáceas e pioneiras (Costa *et al.*, 2020; Da Silva *et al.*, 2021; Fonseca *et al.*, 2024), o que pode ser considerado um indicativo positivo para o ambiente em processo de restauração (Martins *et al.*, 2015). Isso ocorre porque as espécies pioneiras, ao se estabelecerem nas fases iniciais, tem o papel importante de melhorar as condições físicas e químicas do solo, criando um ambiente mais favorável à colonização por espécies mais exigentes de estágios sucessionais mais avançados (Erfanzadeh *et al.*, 2020; Baskin & Baskin, 2023). Essas espécies possuem estratégias adaptativas que permitem a rápida colonização do solo, como ciclos de vida curtos e grande capacidade de dispersão de sementes, contribuindo para a aceleração do processo de restauração florestal (Rodrigues *et al.*, 2019; Da Cruz *et al.*, 2021; Da Silva *et al.*, 2021; Reitschmiedová *et al.*, 2022).

Nesse contexto, podemos citar a família Asteraceae, reconhecida por suas estratégias adaptativas típicas de espécies pioneiras, como a dispersão predominantemente anemocórica e a produção elevada de sementes, que favorecem o recobrimento do solo em ambientes pós perturbação (Sánchez-García *et al.*, 2024; Van Rossum *et al.*, 2024). No presente estudo, essa família foi a segunda mais representativa, com 711 indivíduos, reforçando seu papel recorrente nos bancos de sementes do solo (Martins *et al.*, 2021). Em razão de sua plasticidade, ela é frequentemente registrada como

uma das famílias mais abundantes em estudos de restauração conduzidos na Mata Atlântica (Baider *et al.*, 2001; Franco *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2018).

Espécies em que as sementes emergiram no banco como *Solanum mauritianum*, *Trema micranthum*, *Cecropia glaziovii*, *Zanthoxylum rhoifolium*, *Maclura tinctoria* e *Piper umbellatum* também funcionam como espécies chave no processo de recuperação ambiental (Silva Matos *et al.*, 2005; Stolarski *et al.*, 2017; Salgado *et al.*, 2018; Lubke *et al.*, 2021). Além de apresentarem rápido crescimento, essas espécies têm dispersão zoocórica, produzindo frutos atrativos para fauna, principalmente aves e morcegos (Lima *et al.*, 2016; Andrade, 2019). O deslocamento desses dispersores entre fragmentos florestais e áreas em restauração possibilita o transporte de sementes, aumentando o fluxo de propágulos e a conectividade da paisagem (Dias *et al.*, 2014; Sánchez-García *et al.*, 2024). Vale ressaltar também, que entre as 12 espécies de árvores germinadas, 9 são espécies nativas recomendadas como eficientes na recuperação de ambientes degradados (Carvalho, 2014).

Outra espécie arbórea de destaque do banco de sementes foi *Actinostemon verticillatus*. Ela foi incluída na lista de espécies plantadas no início da restauração, com grande número de indivíduos (262). Essa espécie é nativa e generalista, ou seja, apresenta ampla tolerância ecológica e capacidade de se estabelecer em diferentes condições ambientais, adaptando-se bem ao local e demonstrando eficiência no processo de colonização da área restaurada, predominando no estrato arbóreo (Hollunder *et al.*, 2014; Rocha, 2023). No entanto, no banco de sementes do solo, poucas sementes da espécie germinaram (40) em comparação ao número de indivíduos adultos na área que dispersam sementes abundantes. Isso indica que provavelmente a restauração florestal está caminhando para um estágio sucessional mais avançado, em que espécies generalistas e secundárias iniciais estão diminuindo e favorecendo a entrada de outras espécies mais exigentes (Poorter *et al.*, 2021).

Leucaena leucocephala também foi uma espécie plantada no início da restauração, amplamente conhecida por ser uma espécie rústica, de rápido crescimento e grande dispersão (Feng *et al.*, 2025). Trata-se de uma espécie exótica invasora, que já foi muito utilizada em projetos de recuperação de áreas degradadas, já que seu potencial invasor ainda era desconhecido (Campbell *et al.*, 2019). Assim, é recomendado o monitoramento contínuo em áreas onde foi plantada para que ela não se expresse como espécie monodominante (Zardetto *et al.*, 2026). De acordo com os resultados do banco de sementes, foi possível constatar que não há emergência expressiva desta espécie (apenas

18 indivíduos). Isso porque é adaptada a locais mais quentes e não tolera geadas, como é o caso da área de estudo (Dhanda & Chauhan, 2022). Por isso, sua presença não oferece riscos para a área restaurada.

Cabe destacar que foram encontradas sementes (pinhões) de *Araucaria angustifolia* nas amostras de solo superficial deste estudo; no entanto, trata-se de uma espécie com sementes recalcitrantes, ou seja, que permanecem viáveis por um curto período, não formando banco de sementes persistente. Assim, na época da coleta, as sementes já se encontravam em processo de deterioração, muitas delas apodrecidas, o que explica a ausência de germinação. Ainda assim, a presença de pinhões já secos nas bandejas indica que as árvores da espécie plantadas na área já estão produzindo sementes.

5 CONCLUSÕES

Os resultados indicam que a área que passou por mineração de bauxita, após 20 anos de restauração florestal, apresenta elevado potencial de regeneração, evidenciado pela alta diversidade, riqueza e densidade de sementes no solo superficial, bem como pela baixa dominância ecológica. A predominância de espécies pioneiras, juntamente com a presença de espécies arbóreas nativas dispersas pela fauna, indica a ocorrência de processos ecológicos importantes para a dinâmica da floresta em restauração, como a colonização inicial, o fluxo de propágulos e a conectividade com fragmentos florestais adjacentes. A baixa emergência de espécies generalistas amplamente estabelecidas no dossel e de espécies exóticas invasoras reforça a indicação de avanço sucessional. Dessa forma, a análise do banco de sementes do solo permitiu inferir que a restauração florestal da área se encontra em trajetória positiva, com indícios de progressão sucessional.

6 REFERÊNCIAS

- Adjalla, C., Tosso, F., Salako, K. V., Assogbadjo, A. E. (2022). Soil seed bank characteristics along a gradient of past human disturbances in a tropical semi-deciduous forest: Insights for forest management. *Forest Ecology and Management*, 503, 119744. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119744>.
- Álvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Andrade, A. G., Pereira, C. C., Sperande, V. F., Cornelissen, T. (2023). Small reserve but high diversity: butterfly community across an altitudinal gradient in the Brazilian Atlantic Forest. *Nature Conservation*, v. 53, p. 321–340. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.53.113052>.
- Andrade, M. A. de. (2019). Árvores zoocóricas como núcleos de atração de avifauna e dispersão de sementes. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil.
- APG IV. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181: 1-20.
- Baider, C., Tabarelli, M. & Mantovani, W. (2001). The soil seed bank during Atlantic Forest regeneration in Southeast Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 61(1), 35–44. <https://doi.org/10.1590/S0034-71082001000100006>.
- Balestrin, D., Martins, S. V., Fonseca, W., Cosimo, L. H. E. (2019). Relationship between soil seed bank and canopy coverage in a mined area. *Revista Árvore*, 43(4). <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400003>.
- Balestrin D, Martins SV, Fonseca CA. (2020). Ecological restoration and forest coverage advancement in a region influenced by bauxite mining, Minas Gerais, Brazil. In: de Vlieger K. (Ed.). *Recent advances in ecological restoration*. New York: Nova Science Publishers, 143-154.

Balestrin D., Martins S.V., Fonseca W., Cosimo L.H.E. Relationship between soil seed bank and canopy coverage in a mined area. *Revista Árvore* [J]. 2019, 43(4):e430403. <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400003>.

Balestrin, D.; Martins, S. V.; Fonseca, W. S. (2025). Regeneração natural como técnica para restaurar uma área após mineração de bauxita em Minas Gerais, Sudeste do Brasil. *Revista Thema*. DOI: 10.15536/revistathema.24.2025.3568.

Baskin C.C., Baskin J.M. Seed dormancy in Asteraceae: a global vegetation zone and taxonomic/phylogenetic assessment. *Seed Science Research*. 2023;33(2):135-169. doi:10.1017/S0960258523000107

Benítez-Malvido, J. (2023). In situ soil seed-banks: size, composition and persistence across tropical successional stages. *Plants*, 12(15), 2760. <https://doi.org/10.3390/plants12152760>.

Bogoni J.A., Cherem J.J., Hettwer Giehl E.L., Oliveira-Santos L.G., De Castilho P.V., Picinatto Filho V., Fantacini F.M., Tortato M.A., Luiz M.R., Rizzaro R., Graipel M.E. (2016). Landscape features lead to shifts in communities of medium- to large-bodied mammals in subtropical Atlantic forest. *J Mammal*. 97(3):713–725.

Brancalion, P. H. S., Niamir, A., Broadbent, E. N., Crouzeilles, R., Barros, F. S. M., Almeyda Zambrano, A. M., Baccini, A., Aronson, J., Goetz, S., Reid, J. L., Strassburg, B. B. N., Wilson, S., Chazdon, R. L. (2019). Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science Advances*, 5(7), eaav3223. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3223>.

Brumatti, D. V., da Silva Freitas, W., de Oliveira, C. H. R. (2023). Serapilheira, banco de sementes e fertilidade do solo na região do horto florestal de Ibatiba-ES: um fragmento florestal do bioma Mata Atlântica. *Observatório de la economía latinoamericana*, 21(12), 26243-26267. <https://doi.org/10.55905/oelv21n12-150>.

Campbell, S. D., Vogler, W. D., Brazier, D. A., Vitelli, J. S., Brooks, S. (2019). Weed leucaena and its significance, implications and control. *Tropical Grasslands-Forrajões Tropicales*, 7(4), 280–289. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(7\)280-289](https://doi.org/10.17138/TGFT(7)280-289).

Cardozo, É. P., Costa, L. P. S., Souza, J. P. S., Oliveira, G. S., Pessoa, M. L., Menezes, C. P. S., Costa, A. A. (2025). Dinâmica e importância dos bancos de sementes para a recuperação florestal no Norte de Minas Gerais: uma breve revisão. *Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas*, v. 13, n. 28, p. 274–286. <https://doi.org/10.70597/vozes.v13i28.1067>.

Carvalho, Paulo Ernani Ramalho (org.). (2014). *Espécies Arbóreas Brasileiras*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas. Coleção em 5 volumes.

Costa, P. F., Pereira, Z. V., Santos, B. S. D., Fernandes, S. S. L., Fróes, C. Q., & Barbosa, T. O. (2020). Banco de sementes do solo em áreas restauradas no sul do estado de Mato Grosso do Sul – MS. *Ciência Florestal*, 30(1), 104. <https://doi.org/10.5902/1980509832896>.

Da Cruz, W. J. A., Marimon, B. S., Marimon Júnior, B. H., Amorim, I., Morandi, P. S. & Phillips, O. L. (2021). Functional diversity and regeneration traits of tree communities in the Amazon-Cerrado transition. *Flora*, 285, 151952. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151952>.

Silva, C. V., Martins, S. V., Villa, P. M., Kruschewsky, G. C, Dias, A. A., & Nabeta, F. H. (2021). Banco de semillas de relaves mineros como indicador de recuperación de vegetación en Mariana, Brasil. *Revista de Biología Tropical*, 69(2), 700-716. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i2.41800>

Dhanda, S., & Chauhan, B. S. (2022). Seed germination ecology of leucaena (*Leucaena leucocephala*) as influenced by various environmental parameters. *Weed Science*, 70(3), 335-340. <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.18>.

Dueñez, L. K. S., Martins, S. V., Fonseca, W. da S., Corrêa, F. D. D., Abreu, A. Y. N., Cruz, Y. G. da. (2025). Soil seed bank as a bioindicator of compensatory forest restoration to bauxite mining, Southeast Brazil. *REVISTA DELOS*, 18(66), e4910. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n66-149>.

Erfanzadeh R., Shayesteh Palaye A.A., Ghelichnia H. (2020) Shrub effects on germinable soil seed bank in over-grazed rangelands. *Plant Ecology & Diversity*. 13(2): 199-208. <https://doi.org/10.1080/17550874.2020.1718233>.

Feng, D., Zhang, J., Jin, J., Luo, M., Sun, Y., Liu, C., Jin, Y., Zhu, E., Li, W. (2025). *Leucaena leucocephala* plantations can increase soil organic carbon storage by increasing labile fractions without reducing stability in dry-hot valley savannas. *Ecological Processes*, 14(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s13717-025-00656-3>.

Flora do Brasil (2024). (s. f.). www.reflora.jbrj.gov.br. <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/PrincipalUC/PrincipalUC.do?lingua=es>.

Fonseca, W. S., Martins, S. V., Fioresi, E. M., & Villa, P. M. (2024). Complementing seedling planting with nucleation techniques increases forest restoration potential in areas around bauxite mining. *Land Degradation & Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.5118>.

Franco B.K.S., Martins S.V., Faria P.C.L., Ribeiro G.A. (2012). Density and floristic composition of the seed bank of a stretch of Semideciduous Seasonal Forest on the Campus of the Federal University of Viçosa, Viçosa, MG. *Revista Árvore*. 36(3):423-432. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000300004>.

Furtado, S. G.; Neto, L. M. (2018). Diversity high up: a cloud forest of the Serra da Mantiqueira as a vascular epiphyte hotspot. *Rodriguésia*, v. 69, n. 2, p. 263-279. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201869201>.

Garwood N. C. (1989). Tropical soil seed banks: a review. In: Leck MA, Parker VT, Simpson RL (eds). *Ecology of soil seed banks*. 1st ed. San Diego: Academic Press [C]. 149-209. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-440405-2.50014-2>.

Gonzaga, D.R., Menini Neto, L., Peixoto, A.L. (2020). Cactaceae na Serra da Mantiqueira, Brasil. *Rodriguésia*, v. 71, p. e02572018. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202071080>.

Gonzaga, D. R. & Menini Neto, L. (2019). Patterns of richness and distribution of Cactaceae in the Serra da Mantiqueira, Southeast Brazil, and implications for its conservation. *Acta Botanica Brasilica*, v. 33, n. 1, p. 97-105, jan.-mar. <https://doi.org/10.1590/0102-33062018abb0178>.

Hollunder, R. K., Martins, K. G. G., Luber, J., Souza, R., Ferreira, T. T. C., de Sá Mendonça, E., Garbin, M. L.(2014). Associação entre espécies de sub-bosque e variação

topográfica em um fragmento de Floresta Atlântica no Estado do Espírito Santo. *Acta Scientiae & Technicae*, v. 2, n. 2, p. 35-41.

Lima, I. P., Nogueira, M. R., Monteiro, L. R., Peracchi, A. L., Rolim, S. G., de Menezes, L. F. T., & Srbek-Araujo, A. C. (2016). Frugivoria e dispersão de sementes por morcegos na Reserva Natural Vale, sudeste do Brasil. *Floresta Atlântica de Tabuleiro: diversidade e endemismos na Reserva Natural Vale*. Rupestre, Belo Horizonte, Brazil, 433-452.

Lubke, M., Lubke, L., Schramm Corrêa, B. J., Filippi, M., & Campanhã Bechara, F. (2021). Phenodynamics of *Solanum mauritianum* Scop. in a plantation for subtropical forest restoration. *Floresta*, 51(2), 439–446. <https://doi.org/10.5380/rf.v51i2.69523>.

Marini M.Â., Barbet-Massin M., Martinez J., Prestes N.P., Jiguet F. (2010). Applying ecological niche modelling to plan conservation actions for the Red-spectacled Amazon (Amazona pretrei). *Biol Conserv.* 143(1):102–112. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006320709004091>.

Martins, S. V., Borges, E. E. L., Silva, K. A. (2015). O banco de sementes do solo e sua utilização como bioindicador de restauração ecológica. *Restauração ecológica de ecossistemas degradados*, v. 2, p. 293-330.

Martins SV, Cosimo LHE, Balestrin D, Fonseca WS, Andrade CF, Barros RS. (2020). Restoration of Tree and Shrub Diversity Post Bauxite Mining, in the Southeastern Region of Minas Gerais, Brazil. In: Kristian de Vlieger. (Org.). *Recent Advances in Ecological Restoration*. 1ed. Estados Unidos: Nova, v.1, p. 33-62.

Martins, S. V., Da Silva Fonseca, W., Cosimo, L. H. E., & Balestrin, D. (2021). Soil Seed Banks in Two Environments of Forest Restoration Post Bauxite Mining: Native Tree Plantation and Natural Regeneration. *Research In Ecology*, 3(1), 1-13. <https://doi.org/10.30564/re.v3i1.2631>.

Matos, D. U.; Souza, A. F.; Moura, R. G.; Crossetti, L. O. (2016). Habitat dynamics in subtropical South America: socioeconomic determinants and landscape patterns at a forest–grassland ecotone. *Neotropical Biology and Conservation*, 11(1): 2–12. <https://doi.org/10.4013/nbc.2016.111.01>.

Melo CES & Sánchez LE. (2020). Evaluation of environmental rehabilitation practices in bauxite mining at the plateau of Poços de Caldas. *REM-International Engineering Journal*, 73(2), 247-252.

Miranda Neto A., Martins S.V., Silva K.A., Lopes A.T., Demolinari R.A. (2017). Soil seed bank in a restored bauxite mine in Southeast Brazil. *Floresta e Ambiente*. 24(1):e00125414. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.125414>.

Neves, M. O.; Pereira, E. A.; Lima, L. M. C.; Folly, H.; Oliveira, E. F.; Santana, D. J.; Feio, R. N. (2017). Anurans of Serra Negra da Mantiqueira, Zona da Mata of Minas Gerais, Brazil: a priority area for biodiversity conservation. *Herpetology Notes*, v. 10, p. 297-311.

Nodari, E. Historia de la devastación del bosque de Araucaria en el sur del Brasil. (2016). *Revista Internacional de Ciencias Sociales*, v. 35, p. 75–85.

Oliveira, M. E. A., Martins, S. V., Kettenhuber, P. L. W., dos Santos Oliveira, D. A., & Villa, P. M. (2025). Seed Bank Taxonomic Diversity and Functional Composition in an Area Undergoing Forest Restoration in Brumadinho, Brazil. *Ecological Restoration*, 43(3), 183-194. <https://doi.org/10.3368/er.43.3.183>

Oliveira, A. M. C., Botelho, S. A., Silva, M. A. P., Nogueira, M. O. G., Melo, L. A. (2024). Aspectos funcionais do banco de sementes como indicador de restauração florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 44. <https://doi.org/10.4336/2024.pfb.44e202002085>.

Oliveira T.J.F., Barroso D.G., Andrade A.G., Freitas I.L.J., Amim R.T. (2018). Soil seed bank for use in the recovery of degraded riparian forests in the Northwestern region of Rio de Janeiro State. *Ciência Florestal*. 28(1):206-217. <https://doi.org/10.5902/1980509831653>.

Poorter, L., Rozendaal, D. M. A., Bongers, F., Almeida, J. S., Álvarez, F. S., Andrade, J. L., Arreola Villa, L. F., Becknell, J. M., Bhaskar, R., Boukili, V., Brancalion, P. H. S., César, R. G., Chave, J., Chazdon, R. L., Dent, D. H., ... & Wright, S. J. (2021). Functional recovery of secondary tropical forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(49), e2003405118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2003405118>.

Reis M. S., Montagna T., Mattos, A. G., Filippon S. (2018). Domesticated Landscapes in Araucaria Forests, Southern Brazil: a multispecies local conservation-by-use system. *Front Ecol Evol.* 6(11). <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00011>.

Reitschmiedová, E., Dvorščík, P., Mudrák, O., Šimánová, D. & Frouz, J. (2022). Differences in colonization strategies of three common pioneer woody species in post mining heaps. *Journal of Environmental Management*, 319, 115668. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115668>.

Rocha, S. A. (2023). Composição, estrutura e regeneração de um trecho de floresta ripária estacional semidecidual, Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Volta Redonda, RJ.

Ronquim, C. C., Rodrigues, C., Fonseca, M. Nogueira Júnior, L. R. (2024). Dynamics of the natural regeneration of forest remnants in the state of São Paulo, Brazil. *Sustainability in Debate*, 15(1). <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v15n1.2024.52288>.

Rodrigues, S. B., Freitas, M. G., Campos-Filho, E. M., do Carmo, G. H. P., da Veiga, J. M., Junqueira, R. G. P. & Vieira, D. L. M. (2019). Direct seeded and colonizing species guarantee successful early restoration of South Amazon forests. *Forest Ecology and Management*, 451, 117559. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117559>.

Rodríguez-Uña A, Cruz-Alonso V, Rohrer Z, & Martínez-Baroja L. (2020). Fresh perspectives for classic forest restoration challenges. *Restoration Ecology*. 28(1): 12-15.

Salgado, M. A. S., Rezende, A. V., Sousa-Silva, J. C., Felfili, J. M. & Franco, A. C. (2018). Crescimento inicial de *Zanthoxylum rhoifolium* Lam. em diferentes condições de sombreamento. *Boletim do Herbário Ezechias Paulo Heringer*, 3 (1998), 37–45.

Sánchez-García, R., Green, A. J., Tomasson, L., Hortas, F., & Ortiz, M. A. (2024). Invasive Buttonweed *Cotula coronopifolia* (Asteraceae) Is Halotolerant and Has High Potential for Dispersal by Endozoochory. *Plants*, 13(16), 2219. <https://doi.org/10.3390/plants13162219>.

Silva, K. A. de A., Martins, S. V., Miranda Neto, A. & Lopes, A. T. (2019). Soil seed banks in a forest under restoration and in a reference ecosystem in Southeastern Brazil. *Floresta e Ambiente*, 26(4): e20190047. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.004719>.

Silva, I. A., Dupas, F. A., Costa, C. W., Medeiros, G. D. O. R., & de Souza, A. R. (2021). Spatiotemporal changes in land cover land use in protected areas of Serra da Mantiqueira, Southeastern Brazil. *Environmental Challenges*, 4, 100195. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100195>.

Silva, K. A.; Martins, S. V.; Miranda Neto, A.; Demolinari, R. A.; Lopes, A. T. Restauração florestal de uma mina de bauxita: avaliação do desenvolvimento das espécies arbóreas plantadas. *Floresta e Ambiente*, v. 23, n. 3, p. 309–319, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.14251.

Silva-Matos, D. M., Fonseca, G. D. F. M. & Silva-Lima, L. (2005). Differences on post-fire regeneration of the pioneer trees *Cecropia glazoui* and *Trema micrantha* in a lowland Brazilian Atlantic Forest. *Revista de Biología Tropical*, 53(1-2), 1–4.

Stolarski, O. C., Gorenstein, M. R., Lubke, M., Lubke, L., O'Connor, P. H. P., & Bechara, F. C. (2017). *Trema micrantha* (L.) Blume em plantações para restauração ecológica: desenvolvimento inicial na floresta subtropical brasileira. *Ciência Florestal*, 27(3), 567–581. <https://doi.org/10.5902/1980509833351>.

Souza, A.F. (2021) A review of the structure and dynamics of araucaria mixed forests in southern Brazil and northern Argentina, *New Zealand Journal of Botany*, 59:1, 2-54. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2020.1810712>.

Ter Heerdt, G., Bekker, R. M., Bakker, J. P., & Verweij, G. (1996). An Improved Method for SeedBank Analysis: Seedling Emergence After Removing the Soil by Sieving. *Functional Ecology*, 10(1), 144. <https://doi.org/10.2307/2390273>.

Thomas, P. (2013). *Araucaria angustifolia*. In: The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2013. e.T32975A2829141. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T32975A2829141.en>.

Van Rossum F., Godé C., Baruca A.A., Raspé O., Simsek M., Barigand B., Hardy O.J., Bandelj D. (2024). Genetic diversity assessment of *Helichrysum arenarium* (Asteraceae)

for the genetic restoration of declining populations. *Ecol Evol.* Feb 15;14(2):e10953. doi: 10.1002/ece3.10953.

Vilanova, M. R. N. (2025). The Need for Ecohydrological Research in Brazilian Mountains: the Case of the Serra da Mantiqueira Range. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 68, e25241023. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2025241023>.

Zardetto, J., Simioni, W. & Siqueira, T. (2026). Widespread negative effects of *Leucaena leucocephala* (white-popinac) invasion on regenerating areas of the Atlantic Forest. *Ecological Solutions and Evidence*, 6(4). <https://doi.org/10.1002/2688-8319.70156>.

Zylberberg, T., Rotem, G., Ziv, Y. (2024). Assessing soil seed banks in restoration areas after phosphate mining in the hyper-arid Negev Desert. *Restoration Ecology*, 28, e1067. <https://doi.org/10.70597/vozes.v13i28.1067>.

Capítulo 3: Estrutura fitossociológica e estoque de carbono associados à presença de *Araucaria angustifolia* em área minerada em processo de restauração florestal.

Resumo

A extração de bauxita é uma atividade minerária que necessita de recuperação das áreas após o processo, sendo essencial a utilização de técnicas de restauração florestal. Além de recuperar a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas, a restauração promove o retorno e a conservação de espécies ameaçadas, aumento do estoque de carbono e mitigação das mudanças climáticas, inclusive em formações florestais de elevada importância ecológica. Nesse contexto, o presente estudo foi desenvolvido em uma área de Floresta Ombrófila Mista, na região da Serra da Mantiqueira, e teve como objetivo avaliar a efetividade da restauração de uma área após mineração de bauxita por meio da análise integrada de bioindicadores. Foram calculados os estoques de carbono de indivíduos de *Araucaria angustifolia* plantados em uma área minerada, os parâmetros fitossociológicos do componente arbóreo e atributos do solo. O estudo foi conduzido em uma área de 0,6 ha, no município de Águas da Prata, SP, sudeste do Brasil. A área foi subdividida em duas linhas com 40 pontos amostrais, onde se aplicou o método do ponto-quadrante para as quatro árvores mais próximas com $CAP \geq 10$ cm, registrando-se CAP, altura e identificação taxonômica. Além disso, foram coletadas duas amostras compostas de solo para análise física e química e 40 amostras de serapilheira. Todos os indivíduos de *Araucaria angustifolia* com $DAP \geq 10$ cm foram mensurados quanto a DAP e altura. O estoque individual de carbono das araucárias variou consideravelmente entre valores de 15,10 kg e 331,61 kg. Nos 40 pontos foram registrados 160 indivíduos, distribuídos em 29 espécies e 14 famílias botânicas, com destaque para *Actinostemon verticillatus* (33 indivíduos), *Araucaria angustifolia* (13), *Myrsine coriacea* (13) e *Bauhinia forficata* (12). Na análise de solo constatou-se boa acidez (5,35 e 5,55), teores de matéria orgânica muito bons (10,18 dag/kg e 10,26 dag/kg), que corrobora com os resultados de peso seco de serrapilheira, com registros que alcançam até 600,53 g. Em geral, os resultados indicam que *Araucaria angustifolia* possui grande potencial de estocagem de carbono, contribuindo com altos valores de dominância. Além disso, por ser uma espécie de grande porte, têm características estruturais favoráveis ao estímulo da sucessão ecológica em áreas de restauração. A presença da espécie, aliada a bons índices de diversidade, à ocorrência de espécies zoocóricas, baixa incidência de espécies exóticas e bons

parâmetros edáficos, contribui para a complexidade estrutural e para a consolidação da cobertura vegetal e ecologia da área estudada.

Palavras-chave: mineração de bauxita, bioindicadores ecológicos, Floresta Ombrófila mista, serviços ecossistêmicos

Abstract

Bauxite mining is an extractive activity that requires post-operation land recovery, making the use of forest restoration techniques essential. In addition to restoring ecosystem structure and functioning, restoration promotes the return and conservation of threatened species, increases carbon stocks, and contributes to climate change mitigation, including in forest formations of high ecological importance. In this context, the present study was conducted in a Mixed Ombrophilous Forest area in the Serra da Mantiqueira region and aimed to evaluate the effectiveness of restoring a post-bauxite mining site through the integrated analysis of bioindicators. Carbon stocks of planted individuals of *Araucaria angustifolia* in a mined area, phytosociological parameters of the tree component, and soil attributes were assessed. The study was carried out in a 0.6 ha area in the municipality of Águas da Prata, São Paulo State, southeastern Brazil. The area was subdivided into two transects with 40 sampling points, where the point-centered quarter method was applied to the four nearest trees with CBH $\geq$ 10 cm, recording CBH, height, and taxonomic identification. In addition, two composite soil samples were collected for physical and chemical analyses, as well as 40 litter samples. All *Araucaria angustifolia* individuals with DBH $\geq$ 10 cm were measured for DBH and height. Individual carbon stock of araucaria trees varied considerably, ranging from 15.10 kg to 331,61 kg. A total of 160 individuals were recorded across the 40 points, distributed among 29 species and 14 botanical families, with emphasis on *Actinostemon verticillatus* (33 individuals), *Araucaria angustifolia* (13 individuals), *Myrsine coriacea* (13 individuals), and *Bauhinia forficata* (12 individuals). Soil analysis indicated good soil acidity levels (5.35 and 5.55) and very high organic matter content (10.18 and 10.26), which is consistent with the litter dry mass results, which reached values of up to 600.53 g. Overall, the results indicate that *Araucaria angustifolia* has high carbon storage potential, contributing to high dominance values. Furthermore, as a large-sized species, it presents structural characteristics favorable to the promotion of ecological succession in restoration areas. The presence of this species, together with high diversity indices, the occurrence of zoochorous species, low incidence of exotic species, and favorable soil parameters, contributes to the structural complexity and to the consolidation of vegetation cover and ecosystem functioning in the studied area.

Keywords: bauxite mining; ecological bioindicators; Mixed Ombrophilous Forest; ecosystem services.

1 INTRODUÇÃO

A restauração florestal tem sido amplamente reconhecida como uma estratégia essencial para promover o retorno da vegetação a condições próximas às originais após a ocorrência de distúrbios, os quais podem variar em natureza, intensidade e extensão espacial (Díaz, 2019; Zanini *et al.*, 2021). Esses distúrbios, resultantes de diferentes formas de uso e ocupação do solo, afetam a estrutura da vegetação, os atributos do solo e o funcionamento do ecossistema (Martins *et al.*, 2015). Nesse sentido, a restauração florestal busca não apenas recompor a cobertura vegetal, mas também restabelecer processos ecológicos como a ciclagem de nutrientes, a produção de matéria orgânica e o sequestro e armazenamento de carbono. (Azevedo *et al.*, 2018; Gardon, 2021).

Em áreas mineradas, por exemplo, a restauração florestal se torna essencial para retornar com o ecossistema após alterações do relevo, da estrutura do solo e disponibilidade de nutrientes (Balestrin *et al* 2020; Barbosa *et al* 2021; Gwenzi 2021). No caso da mineração de bauxita, embora os impactos sejam geralmente considerados menos severos quando comparados a outras modalidades de mineração — devido, sobretudo, à retirada superficial do solo e à possibilidade de sua posterior recomposição — os distúrbios gerados ainda demandam intervenções e monitoramento contínuo (Kamble & Bhosale 2019; Balestrin *et al* 2020). Nesse contexto, a avaliação da efetividade da restauração florestal em áreas mineradas torna-se fundamental para verificar a trajetória dos estágios sucessionais da floresta e a integração entre processos ecológicos (Balestrin *et al.*, 2025).

A resposta da restauração florestal a diferentes tipos de distúrbio está associada também ao contexto ecológico no qual o processo ocorre, principalmente em relação à fitofisionomia da área (Crouzeilles *et al.*, 2016; Seidl & Turner, 2022). Nesse contexto, a Floresta Ombrófila Mista é uma formação florestal única que combina espécies de angiospermas com a presença da conífera *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (Passos *et al.*, 2021). Mais do que um componente estrutural da vegetação, a araucária exerce influência sobre a ecologia da floresta, compondo a arquitetura do dossel, a heterogeneidade espacial e a disponibilidade de alimento para a fauna, o que a caracteriza como uma espécie-chave para o funcionamento desse ecossistema (Díaz *et al.*, 2010; Hess *et al.*, 2022).

Em uma Floresta Ombrófila Mista bem conservada, *A. angustifolia* compõe pelo menos 50% da cobertura do dossel (Souza, 2021). Essa composição faz com que a espécie tenha grande influência sobre os processos ecológicos associados ao microclima, à interceptação de luz e à dinâmica de crescimento das demais espécies do componente arbóreo (Brandes *et al.*, 2021; Bernardinis *et al.*, 2023). Entretanto, ao longo do século XX, a intensificação da atividade econômica na região resultou em um processo acentuado de desmatamento dessa fitofisionomia, impulsionado principalmente pela exploração madeireira seletiva da araucária (Forest *et al.* 2018). Além disso, houve alta substituição das florestas nativas por sistemas agrícolas e pastagens, bem como a expansão urbana, que agravaram esse cenário (Matos *et al.* 2016; Nodari 2016).

Essas intervenções antrópicas, associadas principalmente às mudanças no uso e na cobertura da terra, intensificam as emissões de carbono para a atmosfera e contribuem para a acentuação das mudanças climáticas (Sanquetta *et al.*, 2020; Barati *et al.*, 2023). Nesse sentido, a quantificação dos estoques de carbono em ecossistemas florestais constitui uma ferramenta fundamental para avaliar a contribuição dessas áreas para a mitigação das mudanças climáticas (Sanquetta *et al.*, 2019; Silva Júnior *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2025). Estudos voltados à estimativa de carbono fornecem informações úteis para o monitoramento das emissões de gases de efeito estufa, a formulação de políticas públicas ambientais e o planejamento de estratégias de conservação e restauração (Rodrigues *et al.*, 2023).

A compreensão do estoque de carbono em florestas restauradas está intimamente ligada à estrutura da vegetação, sendo a análise fitossociológica do componente arbóreo um fator importante nesse contexto (Salomão *et al.*, 2012). Por meio da caracterização da composição florística, da dominância e da distribuição das espécies, a fitossociologia permite interpretar como a organização da comunidade arbórea influencia o acúmulo de biomassa (Miranda *et al.*, 2019). Além disso, o monitoramento da fertilidade do solo e a quantificação da serapilheira, também possuem igual importância, para acompanhar a evolução da restauração florestal, principalmente em áreas após a mineração (Cavalcante *et al.*, 2023). Nestes ambientes alterados, os atributos físicos, químicos e biológicos do solo são modificados para remoção do minério, sendo a topografia reconstituída após o processo. Dessa forma, acompanhar a evolução das propriedades físicas e químicas, além do acúmulo de matéria orgânica é importante para analisar a eficiência das ações de restauração (Yada *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2020; Sousa *et al.*, 2020).

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar o processo de restauração florestal iniciado há 20 anos em uma área minerada, por meio da avaliação integrada de diferentes bioindicadores. Especificamente, buscou-se estimar o estoque de carbono associado aos indivíduos de *Araucaria angustifolia*, caracterizar a estrutura e a composição florística do componente arbóreo por meio da análise fitossociológica e avaliar os atributos do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em uma área em processo de restauração florestal situada na Serra da Mantiqueira, região de transição entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, no Sudeste do Brasil, inserida no município de Águas da Prata – SP (21°56'38" S; 46°42'18" W). O clima regional é do tipo Cwa, conforme a classificação de Köppen, com verões quentes e chuvosos e invernos secos e de temperaturas amenas (Alvares *et al.*, 2013).

A área estudada (Fig. 1) foi minerada pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), que deu início ao seu processo de restauração florestal no ano de 2005. Situada a 1.403 m de altitude, o entorno da área apresenta vegetação classificada como Floresta Ombrófila Mista (IBGE, 2012), formação que pertence ao domínio da Floresta Atlântica e caracterizada pela presença da conífera *Araucaria angustifolia*.

Em 2005, a área recebeu intervenções típicas de recuperação pós-mineração de bauxita, incluindo a recomposição topográfica e o plantio de mudas. O reflorestamento foi realizado com espécies arbóreas nativas da região, por meio de plantio em área total e, portanto, a área encontra-se atualmente com mais de 20 anos de restauração.

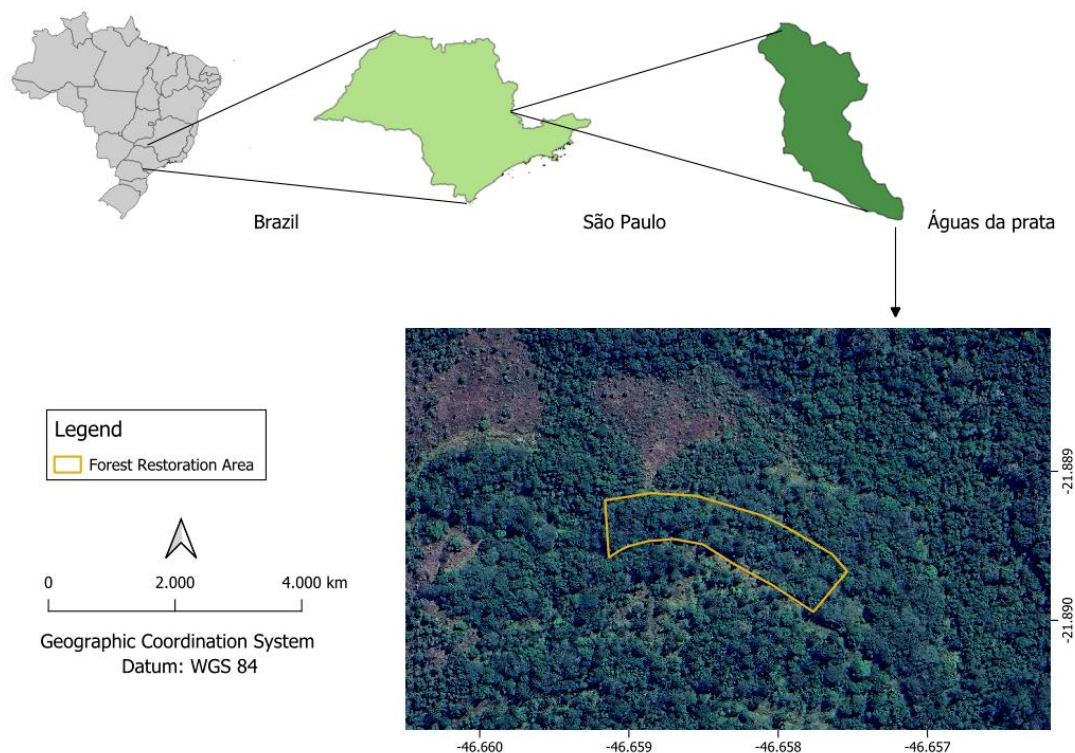


Figura 1: Mapa de localização da área de restauração estudada, Águas da Prata, SP, sudeste do Brasil.

2.2 Coleta de dados

Dentro da área de restauração florestal (0,6 ha) foram mensurados todos os indivíduos arbóreos da espécie *Araucaria angustifolia* com diâmetro à altura do peito (DAP) a 1,3 m do solo maior ou igual a 10 cm (Fig. 2). Para cada indivíduo foram registrados o DAP, a altura total medida com trena a laser e a identificação taxonômica. As araucárias adultas também foram plaqueteadas com etiquetas numeradas, permitindo o controle e monitoramento dos indivíduos.



Figura 2: Mensuração dos indivíduos de *Araucaria angustifolia* em área minerada em processo de restauração florestal, Águas da Prata, SP.

Para a caracterização da vegetação, foram demarcadas duas linhas amostrais no interior do polígono, distantes 14 m entre si e mantendo o afastamento em relação às bordas. Ao longo de cada linha foram demarcados 20 pontos quadrantes, totalizando 40 pontos amostrais. Em cada ponto amostral utilizou-se um gabarito de madeira em formato de cruz. Em cada quadrante da cruz foi amostrado o indivíduo arbóreo mais próximo com CAP (circunferência a altura do peito = 1,3 m) ≥ 10 cm. Para cada árvore selecionada foram medidos o CAP, a altura e registrada a espécie.

A identificação taxonômica seguiu o sistema do Angiosperm Phylogeny Group IV (APG IV, 2016). A nomenclatura botânica foi conferida no Herbário Virtual Flora do Brasil, e as espécies foram classificadas quanto à origem em nativas ou exóticas, quanto ao grupo ecológico em pioneiras (P), pioneira atípica (PA – termo utilizado para explicar o comportamento natural da araucária; uma espécie colonizadora, mas que possui algumas características de espécies secundárias, como por exemplo, ciclo de vida longo e regeneração em áreas abertas), secundárias iniciais (SI) e secundárias tardias (ST), e quanto à síndrome de dispersão em anemocóricas (ane), zoocóricas (zoo), barocóricas (baro) ou autocóricas (auto).

As amostras de solo foram coletadas de forma alternada entre os pontos amostrais, ou seja, em um ponto sim e no seguinte não, ao longo das duas linhas amostrais, cada

uma composta por 20 pontos amostrais. Em cada linha, as amostras simples obtidas foram reunidas e misturadas para formar uma amostra composta, totalizando duas amostras compostas para caracterização do solo da área de estudo. Após a homogeneização em campo, o material foi encaminhado ao Laboratório de Análises de Solo e Planta do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. No laboratório, foram realizadas as análises físicas e químicas, posteriormente interpretadas de acordo com o Guia de Recomendações para corretivos e fertilizantes de Minas Gerais (Ribeiro *et al.*, 1999).

Além disso, em cada ponto amostral foi coletada uma amostra de serapilheira, totalizando 40 amostras de serapilheira. Para a coleta, retirou-se todo o material vegetal não decomposto (folhas, galhos, sementes e frutos) sobre o solo em uma moldura de PVC de 50x50 cm. O material recolhido foi acondicionado em sacos de papel devidamente identificados de 1 a 40 e, posteriormente, encaminhado ao Laboratório de Restauração Florestal (LARF) da Universidade Federal de Viçosa, onde foi submetido à secagem em estufa a 70 °C por um período de 48 horas e, em seguida, teve sua massa seca determinada utilizando-se uma balança analítica.

2.3 Análise de dados

Para a estimativa do estoque de carbono das araucárias foi utilizado o modelo alométrico proposto por Sanquetta *et al.* (2014), conforme a Equação 1:

$$(1) Y = \beta_0 + \beta_1 \times DAP^2 \times H$$

em que: DAP corresponde ao diâmetro à altura de 1,3 m do solo (cm), H à altura total do indivíduo (m), Y ao estoque individual de carbono, e β_0 e β_1 representam os coeficientes do modelo, sendo 7,2153 e 0,0095, respectivamente.

Em relação aos dados obtidos por meio da aplicação do método de ponto-quadrante nos 40 pontos amostrais, estes foram utilizados para a caracterização estrutural da comunidade arbórea da área de estudo. Para o cálculo dos parâmetros fitossociológicos, os valores de circunferência à altura do peito (CAP) foram previamente convertidos em diâmetro à altura do peito (DAP). A partir dessas informações, foram estimadas a frequência relativa, a densidade relativa e a dominância relativa, bem como o Índice de Valor de Importância (IVI). Também foram calculados os índices de

diversidade de Shannon–Wiener (H') e de equabilidade de Pielou (J'), utilizando-se o software Fitopac 2.1 (Shepherd, 2010).

3 RESULTADOS

3.1 Estoque de carbono de *Araucaria angustifolia*

O estoque individual de carbono das araucárias variou consideravelmente na área de estudo (Tabela 1) com valores entre 15,10 kg e 331,61 kg. O menor valor estimado correspondeu a um indivíduo com 10,2 cm de DAP e 8 m de altura. Já o maior estoque foi registrado para um indivíduo bifurcado, com dois fustes medindo 50,9 cm e 21 cm de DAP e altura total de 11 m.

Tabela 1. Estoque de carbono individual da espécie *Araucaria angustifolia*, em área de restauração florestal pós mineração de bauxita, Águas da Prata, sudeste do Brasil.

Indivíduo	Carbono	Indivíduo	Carbono (kg)
o	(kg)		
1	161,35	21	331,61
2	74,24	22	48,92
3	92,38	23	77,16
4	134,91	24	115,37
5	21,11	25	156,60
6	45,42	26	157,03
7	91,71	27	43,89
8	84,20	28	169,39
9	68,28	29	39,69
10	37,92	30	22,98
11	54,03	31	133,86
12	56,41	32	74,30
13	63,55	33	31,25
14	243,77	34	91,08

15	103,22	35	23,98
16	40,99	36	81,00
17	17,89	37	16,57
18	64,47	38	79,32
19	15,10	39	130,64
20	93,10	40	84,53

3.2 Fitossociologia da floresta em restauração

Nas 40 parcelas amostradas foram registrados 160 indivíduos, distribuídos em 29 espécies e 14 famílias botânicas (Tabela 2). O diâmetro médio dos indivíduos foi de 12,19 cm e a altura média de 6,75 m. O índice de diversidade de Shannon–Wiener (H') foi de 2,888, enquanto a equabilidade de Pielou (J') foi de 0,858. *Actinostemon verticillatus* destacou-se como a espécie mais abundante, com 33 indivíduos, seguida por *Araucaria angustifolia* (13), *Myrsine coriacea* (13) e *Bauhinia forficata* (12). Em nível de família, Euphorbiaceae apresentou o maior número de indivíduos (42), seguida por Fabaceae (34), Araucariaceae (13) e Primulaceae (13).

Tabela 2. Parâmetros fitossociológicos da vegetação arbórea em área de restauração florestal pós mineração de bauxita, Águas da Prata, sudeste do Brasil.

Espécies	Nº ind	DR	FR	DoR	IVI	Dispersão	Origem	Grupo Eco.
Anacardiaceae								
<i>Schinus molle</i> L.	1	0,63	0,7	0,04	1,36	zoo	nativa	P
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	9	5,63	6,29	10,72	22,64	zoo	nativa	P
Araucariaceae								
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	13	8,13	9,09	20,29	37,51	zoo/auto	nativa	PA
Bignoniaceae								
<i>Jacaranda macrantha</i> Cham.	9	5,63	6,29	11,48	23,4	ane	nativa	P
Cannabaceae								
<i>Celtis iguanaea</i> (Jacq.) Sarg.	2	1,25	1,4	0,25	2,9	zoo	nativa	SI
Euphorbiaceae								
<i>Actinostemon verticillatus</i> (Klotzsch) Baill.	33	20,63	16,08	13,86	50,57	auto	nativa	SI
<i>Alchornea glandulosa</i> Poepp. & Endl.	3	1,88	2,1	0,2	4,17	zoo	nativa	P
<i>Croton floribundus</i> Spreng.	5	3,13	3,5	3,57	10,19	auto	nativa	P
<i>Croton urucurana</i> Baill.	1	0,63	0,7	0,1	1,42	auto	nativa	P
Fabaceae								
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	1	0,63	0,7	0,97	2,29	auto	nativa	SI
<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.	2	1,25	1,4	0,48	3,13	auto	nativa	SI
<i>Anadenanthera peregrina</i> var. <i>falcata</i> (Benth.) Altschul	4	2,5	2,8	1,85	7,15	auto	nativa	SI
<i>Bauhinia forficata</i> Link	12	7,5	6,99	1,91	16,4	auto	nativa	P
<i>Cojoba chazutense</i> (Standl.) L.Rico	1	0,63	0,7	2,01	3,34	zoo	exótica	SI
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	2	1,25	1,4	0,16	2,81	auto	exótica	P
<i>Machaerium nyctitans</i> (Vell.) Benth.	1	0,63	0,7	0,05	1,37	ane	nativa	SI
<i>Myroxylon peruiferum</i> L. f.	1	0,63	0,7	0,18	1,51	ane	nativa	SI

<i>Platypodium elegans</i> Vogel	10	6,25	6,99	16,57	29,81	ane	nativa	SI
Fagaceae								
<i>Castanea sativa</i> Mill.	1	0,63	0,7	0,71	2,03	baro	exótica	P
Lauraceae								
<i>Nectandra oppositifolia</i> Nees & Mart.	1	0,63	0,7	0,05	1,38	zoo	nativa	P
<i>Persea wilddenovii</i> Kosterm.	4	2,5	2,8	3,59	8,88	zoo	nativa	SI
Lythraceae								
<i>Lafoensia pacari</i> A.St.-Hil.	5	3,13	3,5	1,91	8,53	ane	nativa	SI
Meliaceae								
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	5	3,13	2,8	4,27	10,2	ane	nativa	SI
<i>Guarea kunthiana</i> A.Juss.	3	1,88	1,4	0,84	4,12	zoo	nativa	
Myrtaceae								
<i>Psidium cattleianum</i> Sabine.	5	3,13	3,5	0,25	6,87	zoo	nativa	SI
<i>Psidium guajava</i> L.	6	3,75	4,2	1,19	9,13	zoo	nativa	P
Primulaceae								
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	13	8,13	6,99	1,6	16,72	zoo	nativa	P
Salicaceae								
<i>Casearia sylvestris</i> Sw.	6	3,75	4,2	0,83	8,77	zoo	nativa	P
Urticaceae								
<i>Boehmeria caudata</i> Sw.	1	0,63	0,7	0,07	1,4	ane	nativa	P

Em que: N° ind: número de indivíduos; DR: densidade relativa; FR: frequência relativa; DoR: dominância relativa; IVI: índice de valor de importância; Grupo eco: grupo ecológico; zoo: zoocórica; ane: anemocórica; auto: autocórica; baro: barocórica; PA: pioneira atípica; P: pioneira; SI: secundária inicial.

3.3 Análise de solo

Os resultados das análises químicas e físicas do solo obtidos nas duas linhas amostradas encontram-se apresentados na Tabela 3 e Tabela 4. De acordo com os critérios estabelecidos pelo Guia de Recomendações para Corretivos e Fertilizantes de Minas Gerais (Ribeiro *et al.*, 1999), os valores de pH indicam boa condição de acidez do solo, variando entre 5,35 e 5,55. Os teores de matéria orgânica foram classificados como muito bons, com valores de 10,18 e 10,26 dag/kg. A saturação por bases apresentou níveis médios ($V = 40,1$ e $46,4$), enquanto a soma de bases foi considerada boa ($SB = 5,83$ e $7,54$), assim como a capacidade de troca catiônica, também classificada como boa ($CTC = 5,93$ e $7,58$).

Tabela 3: Análise química do solo de área restaurada pós mineração de bauxita, em Águas da Prata, SP, sudeste do Brasil.

Amostra (0-20cm)	pH (H ₂ O)	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺ (mg/dm ³)	Al ³⁺	SB	t	T	V %	m %	MO dag/kg	Prem mg/L
Águas da prata L I	5,55	2,6	99	5,11	2,18	0,04	7,54	7,58	16,24	46,4	0,5	10,18	22
Águas da prata LII	5,35	4,3	92	3,99	1,6	0,1	5,83	5,93	14,53	40,1	1,7	10,26	20,3

Em que: P: fósforo; K: potássio; Ca²⁺: cálcio; Mg²⁺: magnésio; Al³⁺: alumínio; SB: soma de bases; t: capacidade de troca catiônica; T: capacidade de troca catiônica a pH 7; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; MO: matéria orgânica e Prem: fósforo remanescente.

Tabela 4: Análise física do solo de área restaurada pós mineração de bauxita, em Águas da Prata, SP, sudeste do Brasil.

Classificação granulométrica					Classificação ZARC			Quantidade AD mm/cm
Amostra (0-20cm)	Areia grossa	Areia fina kg/kg	Silte	Argila	Classificação textural	(2) Tipo de Solo	(3) Classe AD	
Águas da prata LI	0,099	0,012	0,168	0,722	Muito argilosa	3	AD6	2,23
Águas da prata LII	0,089	0,011	0,165	0,735	Muito argilosa	3	AD6	2,27

3.4 Serapilheira

Os valores de peso seco da serapilheira acumulada variaram consideravelmente entre os pontos amostrais, com mínimo de 25,08 g e máximo de 600,53 g, evidenciando ampla amplitude nos dados obtidos, conforme apresentado na Tabela 5. A média foi de 181,84 g, que convertida para kg e extrapolada para hectare, resultou em 7.273,60 kg ha⁻¹.

Tabela 5: Valores de peso seco da serapilheira (g) obtidos nos 40 pontos amostrais.

Amostra	Peso seco (g)	Amostra	Peso seco (g)
1	182,13	21	25,08
2	221,38	22	31,1
3	210,12	23	38,49
4	261,29	24	46,69
5	148,34	25	142,03
6	237,34	26	200,31
7	147,53	27	219,12
8	296,61	28	361,66
9	159,42	29	178,58
10	199,72	30	42,13
11	54,4	31	48,2
12	161,8	32	188,4
13	174,12	33	414,97
14	483,76	34	105,64
15	153,69	35	135,57
16	172,71	36	215,98
17	153,36	37	174,29
18	156,73	38	211,22
19	77,6	39	214,94
20	600,53	40	26,6

4 DISCUSSÃO

A alta capacidade de estocagem de carbono de *A. angustifolia* observada neste estudo, em indivíduos adultos de grande porte, está de acordo com resultados encontrados em florestas maduras da formação Floresta Ombrófila Mista. Lipinski *et al.* (2016), avaliaram medições anuais entre 1995 e 2012, e identificaram *A. angustifolia* como a espécie que mais contribuiu para o estoque de carbono em todos os anos analisados. Mognon (2011), também estudando a mesma formação florestal, constatou que *A. angustifolia* foi responsável por aproximadamente 36% do estoque total de carbono da mesma área, principalmente devido ao porte alcançado pela espécie.

Quando comparados a outros estudos, os valores de estoque individual de carbono obtidos nesta pesquisa encontram-se dentro da faixa registrada na literatura. Mailson Roik *et al.* (2020), avaliando uma Floresta Ombrófila Mista, encontraram média de 935,8 kg de carbono por indivíduo de araucária, enquanto Caldeira *et al.* (2015) registraram valores médios menores, de 156,8 kg/ind. Essas diferenças se devem principalmente à idade, ao estágio sucessional e ao porte dos indivíduos, visto que a produção de biomassa tende a aumentar com o avanço da idade, resultando em maior acúmulo de carbono ao longo do tempo (Alexandrov, 2007; Roik *et al.*, 2020). Nesse sentido, podemos constatar que mesmo em áreas em processo de restauração pós-mineração, *A. angustifolia* apresenta elevado potencial de sequestro de carbono à medida que os indivíduos se desenvolvem (Massuquetto, 2018; Roik *et al.*, 2020; Favarin *et al.*, 2023).

O alto estoque de carbono alcançado por *A. angustifolia* demonstra o potencial da espécie para apoiar estratégias de conservação associadas à mitigação das mudanças climáticas, como as políticas de créditos de carbono (Lipinski *et al.*, 2016; Massuquetto, 2018). O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), criado a partir do Protocolo de Kyoto em 1997, contribuiu para a consolidação do mercado de carbono ao permitir que projetos ambientais gerassem benefícios econômicos (Silva, 2010). Entretanto, esse mecanismo é restrito a iniciativas de florestamento e reflorestamento, não abrangendo a conservação ou recuperação de florestas nativas (Borges, 2011). Dessa forma, fica evidente a necessidade de estudar espécies nativas de alto potencial de estocagem de carbono, sendo *A. angustifolia* uma espécie estratégica no contexto de restauração da Mata Atlântica.

Além de sua importância na estocagem de carbono, *Araucaria angustifolia* é uma espécie classificada como ameaçada de extinção e desempenha papel-chave no funcionamento ecológico das Florestas Ombrófilas Mistas, influenciando a estrutura da floresta, a ciclagem de nutrientes e a oferta de recursos para a fauna (Hess *et al.*, 2022). Apesar disso, a espécie ainda é pouco utilizada em projetos de restauração florestal (Machado *et al.*, 2024). Por isso, estudos como esse servem para subsidiar novas pesquisas e iniciativas que promovam sua inserção em projetos de restauração e políticas de mitigação das mudanças climáticas.

Os resultados fitossociológicos da área restaurada também evidenciam o bom desempenho de *Araucaria angustifolia* no processo de recuperação florestal. A espécie destacou-se em segundo lugar como a mais abundante, além de apresentar elevada dominância e alto valor de importância (IVI), ficando atrás apenas de *Actinostemon verticillatus*. Esse padrão corrobora com resultados observados em florestas nativas de Floresta Ombrófila Mista, nas quais a araucária é frequentemente registrada entre as espécies de maior IVI e dominância (Kozera *et al.*, 2006; Oliveira-Lima *et al.*, 2012; Passos *et al.*, 2021; Ribeiro, 2011). Esses autores destacam que, embora *A. angustifolia* nem sempre se apresente como a espécie mais abundante em número de indivíduos, sua contribuição fitossociológica é expressiva em função do grande porte das árvores, refletido principalmente nos elevados valores de área basal e dominância.

Por apresentar essa alta dominância na estrutura da floresta, juntamente com sua capacidade de facilitar a colonização de outras espécies sob suas copas, *Araucaria angustifolia* se classifica com alto potencial para projetos de restauração de áreas alteradas (Passos *et al.*, 2021). A arquitetura emergente da espécie e a formação de microambientes mais sombreados ao seu redor, favorecem o estabelecimento de espécies secundárias da sucessão ecológica, atuando como uma espécie catalisadora (Ribeiro, 2011).

Em relação aos resultados dos parâmetros fitossociológicos, os índices de diversidade da área de estudo reforçam o bom desempenho do processo de restauração florestal. O índice de diversidade de Shannon ($H' = 2,888$) e o índice de equabilidade ($J' = 0,858$) indicam uma comunidade relativamente diversa e com distribuição equilibrada dos indivíduos entre as espécies. Esses resultados são ainda mais positivos considerando que a área foi minerada e teve sua topografia reconstruída. Esses valores são comparáveis aos registrados em florestas nativas da mesma fitofisionomia, onde os índices de Shannon e equabilidade variaram entre 3,579 e 0,824 (Kozera *et al.*, 2006), 2,2 e 0,6 (Lima *et al.*,

2012), 3,96 e 0,85 (Passos *et al.*, 2021) e 3,65 e 0,7 (Ribeiro, 2011), reforçando a eficiência do processo de restauração e a capacidade da área em se aproximar da diversidade de ecossistemas nativos.

Uma possível explicação para os valores de diversidade ainda não serem equivalentes aos observados em ecossistemas nativos é o grande número de indivíduos de *Actinostemon verticillatus* na área estudada. Essa espécie destacou-se como a mais abundante (33) e com maior valor de importância (50,57), o que influencia diretamente os índices de diversidade. *A. verticillatus* foi plantada em grande número no início do processo de restauração florestal e, por se tratar de uma espécie generalista, apresentou ótima capacidade de adaptação às condições locais, dispersando-se de forma eficiente (Hollunder *et al.*, 2014; Rocha, 2023). Ainda assim, essa boa dispersão contribuiu positivamente para o recobrimento do substrato da área e para a facilitação do estabelecimento de espécies mais exigentes na sucessão.

Grande parte das espécies registradas na área apresenta dispersão zoocórica (44,82%), incluindo *Alchornea glandulosa*, *Casearia sylvestris*, *Celtis iguanea*, *Guarea kunthiana*, *Croton urucurana*, *Myrsine coriacea* e outras. Essa característica é muito positiva para projetos de restauração, pois atrai dispersores que podem trazer propágulos de fragmentos florestais do entorno, favorecendo a chegada de novas espécies e promovendo maior conectividade da paisagem (Sánchez-García *et al.*, 2024). Além disso, foi observado um baixo número de indivíduos de espécies exóticas na área, como *Leucaena leucacephala* (2 indivíduos), *Cojoba chazutense* (1) e *Castanea sativa* (1). Embora *Leucaena leucacephala* seja caracterizada como espécie exótica invasora, não representa risco de expansão na área estudada, já que sua dispersão é limitada em regiões de clima mais ameno e com ocorrência de geadas, como ocorre nas partes altas da Serra da Mantiqueira, entre Poços de Caldas, MG e Águas da Prata, SP (Dhanda & Chauhan, 2022).

A composição florística indica um grande avanço no processo de restauração da vegetação, porém, é relevante também avaliar como essas mudanças refletem nas propriedades do solo, um componente essencial para o sucesso a longo prazo da restauração (Carmeis-Filho *et al.*, 2017). Espera-se que, ao longo do tempo, o avanço da cobertura florestal incremente teores de matéria orgânica (MO), que está diretamente relacionada com outros parâmetros químicos, como o aumento da disponibilidade de nutrientes (Soares *et al.*, 2020). Esse processo ocorre em função das interações entre vegetação, solo e microrganismos, em que a deposição de serapilheira e a renovação

radicular fornecem substrato para a atividade biológica (Zhang *et al.*, 2025). A decomposição desse material orgânico aumenta a ciclagem de nutrientes, favorece a formação de agregados do solo e aumenta a capacidade de troca de cátions, criando um ambiente progressivamente mais complexo (Pavinato & Rosolem, 2008).

Sendo assim, fica claro que a MO é um dos pilares para a sustentabilidade do ecossistema em restauração (Bispo *et al.*, 2023). Nas duas linhas avaliadas neste estudo, os teores de MO foram classificados como muito bons, destacando-se inclusive quando comparados a resultados obtidos em outras áreas mineradas por bauxita. Balestrin *et al.* (2025), por exemplo, registraram após 6 anos de restauração, teor de MO de 3,83 dag/kg seis. De forma semelhante, Fonseca *et al.* (2023) observaram valores de apenas 0,25 dag/kg logo após a reconfiguração topográfica da área minerada e, mesmo após dois anos com uso de adubos verdes, os teores variaram entre 1,88 e 2,28 dag/kg. Os altos teores de MO encontrados no presente trabalho (10,18 e 10,26 dag kg⁻¹) estão associados, principalmente, ao tempo de implantação da restauração, superior a 20 anos, que favorece o acúmulo progressivo de material orgânico, além das condições climáticas mais amenas da região, que tendem a reduzir a taxa de decomposição.

Corroborando esses resultados, os valores de peso seco da serapilheira indicam aporte expressivo de material orgânico na área em restauração. A grande variação observada entre os pontos amostrais, com registros que alcançam até 600,53 g, indica que, apesar da heterogeneidade espacial, há locais com alto acúmulo de resíduos vegetais. A média da serapilheira entre os 40 pontos, quando convertida para kg/hectare resultou em 7.273,60 kg ha⁻¹, valor um pouco superior ao de $6,772 \pm 1,940$ kg ha⁻¹ encontrado em outra área minerada de bauxita em processo de restauração na Zona da Mata mineira (Miranda-Neto *et al.*, 2015) e de 6.310 kg.ha⁻¹ em uma floresta secundária em estágio inicial na mesma região (Pinto *et al.*, 2008), refletindo a funcionalidade ecológica do ecossistema em restauração. Esse material constitui a principal via de entrada de matéria orgânica no solo, contribuindo diretamente para a manutenção dos elevados teores de MO observados. Dessa forma, a presença e o acúmulo de serapilheira reforçam o estágio mais avançado da restauração na área estudada, mostrando que a vegetação está bem desenvolvida e o ambiente mais equilibrado.

5 CONCLUSÃO

Este estudo evidencia que *Araucaria angustifolia* apresenta elevado potencial de estocagem de carbono, contribuindo com altos valores de área basal e volume, característica natural da espécie nas áreas de Floresta Ombrófila Mista. Além disso, demonstra que por ser uma espécie de grande porte, possui características estruturais favoráveis ao estímulo da sucessão ecológica em áreas em restauração. A presença da espécie, aliada a bons índices de diversidade, à ocorrência de espécies zoocóricas e à baixa incidência de espécies exóticas, contribui para a complexidade estrutural e para a consolidação da cobertura vegetal. A qualidade do solo, refletida pelos elevados teores de matéria orgânica, indica também que, mesmo em áreas mineradas, a restauração florestal promove condições favoráveis à recuperação ambiental. Dessa forma, este estudo reforça a importância de *A. angustifolia* como espécie estratégica para a restauração da Floresta Ombrófila Mista na Serra da Mantiqueira, a conservação da biodiversidade e a mitigação das mudanças climáticas, fornecendo subsídios para novos projetos e pesquisas com foco na recuperação de ecossistemas naturais.

6 REFERÊNCIAS

Alexandrov, G. A. (2007). Carbon stock growth in a forest stand: the power of age. *Carbon Balance and Management*, 2, 4. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-2-4>.

Azevedo A.D., Camara R., Francelino M.R., Pereira M.G., Leles PSS (2018). Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. *Floresta* 48(2): 183–194. <https://doi.org/10.5380/rf.v48i2.54447>.

Balestrin D., Martins S.V., Fonseca W.S. (2025). Regeneração natural como técnica para restaurar uma área após mineração de bauxita em Minas Gerais, Sudeste do Brasil. *Revista Thema*, 24(2): 1–16. <https://doi.org/10.15536/revistathema.24.2025.3568>

Balestrin D, Martins SV, Fonseca CA. (2020). Ecological restoration and forest coverage advancement in a region influenced by bauxite mining, Minas Gerais, Brazil. In: de Vlieger K. (Ed.). *Recent advances in ecological restoration*. New York: Nova Science Publishers, 143-154.

Balestrin, D., Venâncio Martins, S., & da Silva Fonseca, W. da S. (2025). Regeneração natural como técnica para restaurar uma área após mineração de bauxita em Minas Gerais, Sudeste do Brasil. *Revista Thema*, 24(2), 1–16. <https://doi.org/10.15536/revistathema.24.2025.3568>.

Barati, A. A., Zhoolideh, M., Azadi, H., Lee, J.-H., & Scheffran, J. (2023). Interactions of land-use cover and climate change at global level: How to mitigate the environmental risks and warming effects. *Ecological Indicators*, 146, 109829. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109829>.

Barbosa R.S, Pereira G.F.M, Ribeiro S.S., Hage A.L.F., Costa G.F., Salomão R.P., Schwartz G. (2021). Key species selection for forest restoration after bauxite mining in the Eastern Amazon. *Ecological Engineering*, 162, 106190.

Bernardinis, G. B., Cobos, M. E., Brum, F. T., Marques, M. C. M., Peterson, A. T., Carlucci, M. B., Zwiener, V. P. (2023). Ecological restoration and protection of remnants are key to the survival of the critically endangered *Araucaria angustifolia* under climate change. *Global Ecology and Conservation*. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02668>.

Bispo, D. F. A., Guimarães, D. V., Marques, J. J. G. de S. e Melo, M. L. N. S., Curi, N. (2023). Soil Organic Carbon as Response to Reforestation Age and Land Use Changes: A Qualitative Approach to Ecosystem Services. *Sustainability*, 15(8), 6863. <https://doi.org/10.3390/su15086863>.

Brandes, A. F. d. N., Albuquerque, R. P., Lisi, C. S., de Lemos, D. N., Nicola, L. R. M., Melo, A. L. F., Barros, C. F. (2021). The growth responses of *Araucaria angustifolia* to climate are adjusted both spatially and temporally at its northern distribution limit. *Forest Ecology and Management*, 487, 119024. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119024>.

Borges, L. C. R. (2011). Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação – REDD: desafios e oportunidades para o Brasil no contexto das mudanças climáticas. 198 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília.

Caldeira M.V.W., Watzlawick L.F., Viera M., Balbinot R., Castro K.C. Biomassa e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. *Ciência Florestal* 2015; 25(4): 1027-1034. 10.5902/1980509820664 <https://doi.org/10.5902/1980509820664>.

Carmeis-Filho A.C., Penn C.J., Crusciol C.A., Calonego J.C. (2017). Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2017; 241(6): 11-23 <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.027>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.027>.

Cavalcante, D. M., Silva, I. R., Oliveira, T. S. (2023). Soil quality indicators for monitoring the short-term effects of mined soil rehabilitation strategies for bauxite. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 47, e0220126. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220126>.

- Forest Ecology and Management. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119024>.
- Crouzeilles R., Curran M., Ferreira M.S., Lindenmayer D.B., Grelle C.E.V., Rey Benayas J.M. (2016). A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. Nature Communications 7:11666. <https://doi.org/10.1038/ncomms11666>.
- Dhanda, S., & Chauhan, B. S. (2022). Seed germination ecology of leucaena (*Leucaena leucocephala*) as influenced by various environmental parameters. Weed Science, 70(3), 335-340. <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.18>.
- Díaz S.; Settele J, Brondízio E.S, Ngo HT, Agard J, Arneth A, ... & Zayas, C. N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. Science, 366(6471).
- Díaz, S., et al. (2010). Fatores ecológicos determinantes na ocorrência de *Araucaria angustifolia* e *Podocarpus lambertii* na Floresta Ombrófila Mista da FLONA de São Francisco de Paula, RS, Brasil. Ciência Florestal, 40(1), 51–60. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000220>.
- Fonseca, W. D. S., Martins, S. V., Villa, P. M. (2023). Green manure as an alternative for soil recovery in a bauxite mining environment in Southeast Brazil. *Floresta e Ambiente*, 30(1), e20220041.
- Forest F, Moat J, Baloch E, Brummitt NA, Bachman SP, Ickert-Bond S, Hollingsworth PM, Liston A, Little DP, Mathews S, et al. (2018). Gymnosperms on the EDGE. Sci Rep. 8(1):6053.
- Gardon F.R. (2021). Serviços ecossistêmicos de carbono, composição e estrutura florestal em uma cronosequência de plantios de restauração [tese]. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.41.2021.tde-25052021-091125>.
- Gwenzi W. (2021). Rethinking restoration indicators and end-points for post-mining landscapes in light of novel ecosystems. Geoderma, 387, 114944.

Hess, A. F. F., Loiola, T., Souza, I. A. de, Minatti, M., Broadbent, E. N., Borsoi, G. A. (2022). Forest management for the conservation of *Araucaria angustifolia* in southern Brazil. *Floresta*, 48(3), 553–566. <https://doi.org/10.5380/rf.v48i3.55452>.

Hollunder, R. K., Martins, K. G. G., Lubner, J., Souza, R., Ferreira, T. T. C., de Sá Mendonça, E., Garbin, M. L. (2014). Associação entre espécies de sub-bosque e variação topográfica em um fragmento de Floresta Atlântica no Estado do Espírito Santo. *Acta Scientiae & Technicae*, v. 2, n. 2, p. 35-41.

Hu, Y., Yu, Z., Fang, X., Zhang, W., Liu, J., & Zhao, F. (2020). Influence of Mining and Vegetation Restoration on Soil Properties in the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4288. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124288>.

Kamble PH & Bhosale SM. (2019). Assessment of Impact of Bauxite Mining on Environment. *i-Manager's Journal on Future Engineering and Technology*. 14(4):14-21.

Kozera, C., Dittrich, V. A. de O., Silva, S. M. (2006). Fitossociologia do componente arbóreo de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana, Curitiba, PR, BR. *Floresta*, 36(2), 225–237. <https://doi.org/10.5380/rf.v36i2.6456>.

Lipinski, E. T., Dalla Corte, A. P., Sanquetta, C. R., Rodrigues, A. L., Mognon, F., Behling, A. (2017). Dinâmica da biomassa e carbono arbóreo entre 1995–2012 em Floresta Ombrófila Mista Montana. *Floresta*, 47(2), 197–206. <https://doi.org/10.5380/rf.v47i2.40024>.

Machado, J. A. R., Freitas, M. L. M., Paiva, D. I., Souza, B. M., Sousa, V. A. D., Martins, K. M., Oliveira, E. B. (2024). Economic Evaluation of Conservation through Use of an *Araucaria angustifolia* Provenance and Progeny Test. *Plants*, 13(18), 2580. <https://doi.org/10.3390/plants13182580>.

Martins, S. V., Miranda Neto, A., Ribeiro, T. M. (2015). Uma abordagem sobre diversidade e técnicas de restauração ecológica. In: Martins, S. V. (Ed.). *Restauração*

ecológica de ecossistemas degradados. 2ª edição, Editora UFV, Universidade Federal de Viçosa.

Massuquetto, L. F. (2018). Estimativa de biomassa aérea e estoque de carbono de *Araucaria angustifolia* ao longo de um inventário contínuo em fragmento urbano de Floresta Ombrófila Mista. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

Matos D.U., Souza A.F., Moura R.G., Crossetti L.O. (2016). Habitat dynamics in subtropical South America: Socioeconomic determinants and landscape patterns at a forest-grassland ecotone. *Neotropical Biology and Conservation*. Vol. 11, no. 1 (abr. 2016), p. 2-12.

Miranda, C. do C., Donato, A. D., Figueiredo, P. H. A., Bernini, T. A., Roppa, C., Trece, I. B., & Barros, L. O. (2019). Levantamento fitossociológico como ferramenta para a restauração florestal da Mata Atlântica, no Médio Paraíba do Sul. *Ciência Florestal*, 29(4), 1601–1613. <https://doi.org/10.5902/1980509833042>.

Miranda Neto, A., Martins, S. V., Silva, K. D. A., Lopes, A. T., & Demolinari, R. D. A. (2015). Litter production and leaf litter decomposition in mined area in restoration process in southeast Brazil. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(23), 321-327.

Mognon, F. (2011) Dinâmica do estoque de carbono como serviço ambiental prestado por um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana localizada no sul do estado do Paraná. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) –Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Nodari, E. S. (2016). Historia de la devastación del Bosque de *Araucaria* en el sur del Brasil. Áreas. *Revista Internacional de Ciencias Sociales*, (35), 75-85.

Oliveira-Lima, T. E. de, Hosokawa, R. T., Machado, S. do A. (2012). Fitossociologia do componente arbóreo de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Aluvial no município de Guarapuava, Paraná. *Floresta*, 42(3), 553–564. <https://doi.org/10.5380/rf.v42i3.24747>.

Passos, M. G. dos, Prado, G. P. do, Fontana, C., Bianchini, E. (2021). Structure and tree diversity in a Mixed Ombrophilous Forest remnant, southern Brazil. *FLORAM*, 28(2), e20200064. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2020-0064>.

Pavinato, P. S. & Rosolem, C. A. (2008). Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(3), 911–920.

Pinto, S. I. D. C., Martins, S. V., Barros, N. F. D., & Dias, H. C. T. (2008). Produção de serapilheira em dois estádios sucessionais de Floresta Estacional Semidecidual na Reserva Mata do Paraíso, em Viçosa, MG. *Revista Árvore*, 32 (3), 545-556.

Ribeiro, A. C., Guimarães, P. T. G., Venegaz, V. H. A. 5ª Aproximação - Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Viçosa – MG: Editora UFV, 1999.

Ribeiro, T. M. (2011). Florística e estrutura da comunidade arbustivo-arbórea em florestas naturais e restauradas com *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze no estado de São Paulo, Brasil. 261 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

Rocha, S. A. (2023). Composição, estrutura e regeneração de um trecho de floresta ripária estacional semidecidual, Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Volta Redonda, RJ.

Roik, M., Machado, S. A., Figueiredo Filho, A., Sanquetta, C. R., Ruiz, E. C. Z. (2020). Aboveground Biomass and Organic Carbon of Native *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. *Floresta e Ambiente*, 27(3), e20180103. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.010318>.

Rodrigues, C. I. D., Brito, L. M., Nunes, L. J. R. (2023). Soil Carbon Sequestration in the Context of Climate Change Mitigation: A Review. *Soil Systems*, 7(3), 64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030064>.

Salomão, R. de P., Santana, A. C. de, Brienza Júnior, S., Gomes, V. H. F. (2012). Análise fitossociológica de floresta ombrófila densa e determinação de espécies-chave para recuperação de área degradada através da adequação do índice de valor de importância. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Ciências Naturais*, 7(1), 57–102. <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v7i1.606>.

Sánchez-García, R., Green, A. J., Tomasson, L., Hortas, F., & Ortiz, M. A. (2024). Invasive Buttonweed *Cotula coronopifolia* (Asteraceae) Is Halotolerant and Has High Potential for Dispersal by Endozoochory. *Plants*, 13(16), 2219. <https://doi.org/10.3390/plants13162219>.

Sanquetta, C., Dalla Corte, A. P., Sanquetta, M., Pelissari, A., Tomé, M. (2020). Greenhouse gas emissions due to land use change in Brazil from 1990 to 2015: comparison of methodological approaches. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 53, 25–37. <https://doi.org/10.5380/dma.v53i0.68494>.

Sanquetta, C. R., Sanquetta, M. N. I., Maas, G. C. B., Pelissari, A. L., Dalla Corte, A. P., Piva, L. R. de O. (2019). Métodos de quantificação do estoque de carbono na biomassa de *Nectandra grandiflora* Nees em remanescente de Floresta Ombrófila Mista. *Acta Iguazu*, 8(1), 41–49. <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v8i1.18806>.

Seidl R. & Turner M.G. (2022). Post-disturbance reorganization of forest ecosystems in a changing world. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 119(28): e2202190119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2202190119>.

Silva, J. A., Ribeiro, S. C., Cruz, L. C. S. C., Oliveira, P. M., Almeida, D. F., Cunha, T. A. (2025). Dinâmica e estoque de carbono em uma floresta manejada na Reserva Extrativista Chico Mendes. *Biodiversidade Brasileira*, 15(3), 92–105. <https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v15i3.2726>.

Silva Júnior, A. R. S., Ferreira do Carmo, I. R., Araújo, P. S. (2024). Quantificação dos estoques de carbono acima do solo da Amazônia Maranhense. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(4), [páginas]. (Artigo publicado em 2024, com aplicação de

sensoriamento remoto e quantificação de carbono para avaliação de estoque florestal e mitigação de mudanças climáticas).

Silva, F. M. O desenvolvimento sustentável e os projetos de MDL no Brasil. *Revista Brasileira de Direito Constitucional*, v. 16. p. 51-67, 2010.

Soares J.A.H., de Souza A.L.T., Pestana L.F.A., Tanaka M.O. (2020). Combined effects of soil fertility and vegetation structure on early decomposition of organic matter in a tropical riparian zone. *Ecological Engineering* 2020; 152(12): e105899. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105899>

Sousa, S. S. de, Freitas, D. A. F., Latini, A. O., Silva, B. M., Viana, J. H. M., Campos, M. P., Peixoto, D. S. (2020). Iron ore mining areas and their reclamation in Minas Gerais State, Brazil: Impacts on soil physical properties. *SN Applied Sciences*, 2, 11957. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03457-9>.

Souza, A.F. (2021). A review of the structure and dynamics of araucaria mixed forests in southern Brazil and northern Argentina, *New Zealand Journal of Botany*, 59:1, 2-54. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2020.1810712>.

Yada, M. M., Mingotte, F. L. C., Melo, W. J. de, Melo, G. P. de, Melo, V. P. de, Longo, R. M., Ribeiro, A. Í. (2015). Chemical and Biochemical Properties of Soils Degraded by Tin Mining and in a Rehabilitation Phase in the Amazon Basin. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(3), 714–724. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140499>.

Zhang, X., Luo, H., Yang, X., Lei, Y., Wang, B., Zhang, H., Chen, D. (2025). Divergent effects of root and leaf litter on soil microbial biomass in global forest ecosystems. *Soil Ecology Letters*, 7(3), 250332. <https://doi.org/10.1007/s42832-025-0332-0>

Zanini, A. M. et al. The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, v. 481, p. 1–11, 2021.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo mostraram que a área de restauração florestal pós-mineração de bauxita apresenta uma trajetória positiva, com alto potencial de regeneração e sinais claros de progressão sucessional. A análise do banco de sementes evidenciou elevada diversidade, riqueza e densidade de espécies. Na análise fitossociológica da regeneração, houve forte presença da espécie nativa *Actinostemon verticillatus*, indicando que seu uso em áreas mineradas da região tende a favorecer o processo de restauração, recobrando o solo e melhorando a qualidade do ambiente para espécies mais exigentes da sucessão. A ocorrência de espécies zoocóricas reforça o papel da fauna na manutenção da diversidade e na dispersão de propágulos, enquanto a baixa emergência de espécies exóticas indica baixo risco de invasão.

Araucaria angustifolia demonstrou ter papel estratégico na restauração, devido ao seu alto potencial de estocagem de carbono e características estruturais que funcionam como catalisadoras para outras espécies. A combinação de alta diversidade da área de estudo, complexidade estrutural e bons atributos do solo indica que a área consegue sustentar funções ecológicas essenciais, promovendo a consolidação da cobertura vegetal e contribuindo para a conservação da biodiversidade e a mitigação das mudanças climáticas.

Dessa forma, este trabalho fornece subsídios para o uso de espécies-chave, como *A. angustifolia* e outras nativas regionais, em projetos de restauração de Floresta Ombrófila Mista, destacando a importância do monitoramento integrado de bioindicadores para avaliar a efetividade das ações de recuperação ambiental e planejar futuras intervenções.