

WILLIAM VICTOR LISBOA ALVES

**RESTAURAÇÃO FLORESTAL EM ÁREAS ATINGIDAS PELO REJEITO DA
BARRAGEM DE FUNDÃO, MINAS GERAIS, BRASIL**

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: Sebastião Venâncio Martins

Coorientador: Pedro Manuel Villa

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

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

T

A474r
2022
Alves, William Victor Lisboa, 1994-
Restauração florestal em áreas atingidas pelo rejeito da
barragem de Fundão, Minas Gerais, Brasil / William Victor
Lisboa Alves. – Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (81 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexo.

Orientador: Sebastião Venâncio Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.690>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Bancos de sementes. 2. Reflorestamento. 3. Solos -
Compactação. 4. Minas e mineração. 5. Barragens de rejeitos.
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 22. ed. 634.923231

WILLIAM VICTOR LISBOA ALVES

**RESTAURAÇÃO FLORESTAL EM ÁREAS ATINGIDAS PELO REJEITO DA
BARRAGEM DE FUNDÃO, MINAS GERAIS, BRASIL**

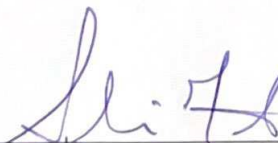
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 07 de julho de 2022.

Assentimento:



William Victor Lisboa Alves
Autor



Sebastião Venâncio Martins
Orientador

*Dedico este trabalho às pessoas mais especiais
da minha vida: meus pais, meus irmãos e minha
noiva.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela saúde e determinação que me permitiram chegar até aqui.

Aos meus pais, Elizângela e Wantuil, por todo o esforço que sempre fizeram para que eu pudesse conquistar meus objetivos e principalmente por todo o amor que me dão. Sem vocês eu não chegaria a lugar nenhum.

Aos meus irmãos, Eliza e Henrique, por todo companheirismo e amizade, e por me provarem que eu nunca estarei sozinho.

À minha noiva, Thaís, por todo amor e carinho me fazendo mais feliz a cada dia e também pelo grande apoio e motivação. Te amo!

Ao meu orientador, Prof. Sebastião Venâncio Martins, grande motivador para que eu pudesse realizar este trabalho. Agradeço pela confiança depositada em mim, pela atenção e todos os ensinamentos.

Ao meu coorientador, Pedro Villa por toda orientação, assistência e paciência comigo.

À toda equipe do LARF por todo apoio nas coletas de dados de campo e em laboratório e por todas as experiências compartilhadas.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realizar a pós-graduação e por toda infraestrutura disponibilizada.

Ao Departamento de Engenharia Florestal, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal pelo apoio à pesquisa científica.

À Fundação Renova pelo apoio financeiro e logístico por meio do convênio com o LARF-UFV com interveniência da SIF-UFV.

Ao Sr. Maurício Machado por disponibilizar as áreas de sua propriedade para realização das pesquisas e por todo o apoio logístico oferecido.

Enfim, agradeço a todos meus amigos e familiares que direta ou indiretamente fizeram parte desta trajetória.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

ALVES, William Victor Lisboa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2022. **Restauração florestal em áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão, Minas Gerais, Brasil.** Orientador: Sebastião Venâncio Martins. Coorientador: Pedro Manuel Villa.

Desde o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, diversas práticas de restauração ecológica têm sido realizadas para recuperar comunidades vegetais e propriedades do solo. Nesse contexto, o presente estudo avaliou o processo e técnicas alternativas de restauração ecológica em áreas afetadas pelos rejeitos da barragem de Fundão e outras áreas da bacia do Rio Doce. Primeiramente, avaliou-se o uso de bolas de sementes como técnica alternativa para restauração florestal utilizando diferentes substratos. Assim, os tratamentos utilizados foram: R3: Rejeitos (3 cm de diâmetro da bola de sementes, DBS), R6: Rejeitos (6 cm DBS), RCO3: Rejeitos + Composto Orgânico (3 cm DBS), RCO6: Rejeitos + Composto Orgânico (6 cm DBS), RCA3: Rejeitos + Argila (3cm DBS), RCA6: Rejeitos + Argila (6 cm DBS), RFC3: Rejeitos + Carvão Fino (3 cm DBS) e RFC6: Rejeitos + Carvão Fino (6 cm DBS). Dentro de cada bola foram adicionadas 20 sementes distribuídas em quatro espécies arbóreas nativas (cinco sementes para cada espécie utilizada). As bolas de sementes foram mantidas em estufa no viveiro da Universidade Federal de Viçosa, sendo monitoradas semanalmente quanto à germinação das sementes até 100 dias após o início do experimento. Foram registradas 540 sementes germinadas, pertencentes às quatro espécies (*Peltophorum dubium*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Ceiba speciosa* e *Colubrina glandulosa*) e aos oito tratamentos. Bolas de menor diâmetro apresentaram melhores taxas de germinação em comparação com seus pares de substratos. Além disso, os maiores valores médios de germinação foram alcançados pelo RFC3. Nesse contexto, a técnica de bola de sementes mostrou-se uma alternativa viável para a restauração de áreas atingidas por rejeitos e outras áreas de difícil acesso. Em segundo lugar, avaliamos o banco de sementes do solo em áreas atingidas por rejeitos de mineração em restauração em Barra Longa, Minas Gerais. Assim, foram definidos três ambientes de acordo com a paisagem do entorno: Ambiente I – próximo à pastagem, Ambiente II – intermediário (entre pastagem e floresta), Ambiente III – próximo à floresta. Em cada ambiente foram coletadas 30 amostras, colocadas em uma bancada sob sombra (50%) e avaliadas durante nove meses no viveiro de pesquisas da Universidade Federal de Viçosa. Nos três ambientes, foi observado predomínio de espécies nativas, pertencente ao grupo de pioneiras, com hábitos herbáceos e síndrome de dispersão

anemocórica. Em relação ao número total de indivíduos nos três ambientes, também houve dominância de pioneiros com hábitos herbáceos e síndrome de dispersão anemocórica, e indivíduos nativos e exóticos representaram proporção parecida do total com base na origem. Os resultados alcançados neste estudo destacam a importância da restauração florestal ativa por meio do plantio de mudas nativas nessas áreas, e a necessidade de um bom programa de monitoramento para garantir o sucesso dos projetos de restauração. Terceiro, avaliou-se o efeito de técnicas de preparo do solo (subsolagem ou não) na resistência à penetração do solo e parâmetros de crescimento de mudas nativas em plantios de restauração em rejeitos de mineração em Barra Longa, Minas Gerais. Assim, foram instaladas sistematicamente 28 parcelas permanentes, sendo 14 em área onde foi realizada subsolagem do Tecnosolo e 14 em área sem subsolagem do Tecnosolo, sendo estes os dois tratamentos considerados. Entre o 4º e o 15º mês após o plantio das mudas, foram realizadas três avaliações, onde foram coletados dados de altura e diâmetro ao nível do solo (DNS) das mudas localizadas dentro das parcelas. Em seguida, foram medidos os incrementos em altura e DNS para os tratamentos. Além disso, também foram coletados dados de resistência do solo à penetração em duas estações distintas (seca/chuvosa). Foram encontradas diferenças significativas entre as médias de resistência à penetração do solo dentro dos tratamentos e entre os tratamentos, considerando os dois períodos avaliados. Os valores médios obtidos, em ordem decrescente, foram: Covas de plantio – Seca: 1124,6 kPa; Covas de plantio – Chuva: 750,1 kPa; Subsolagem – Seco: 543,5 kPa; Subsolagem – Chuva: 245,3 kPa. Diferenças significativas também foram observadas ao analisar os incrementos de altura e DNS entre os tratamentos ao longo do tempo, com o tratamento Subsolagem apresentando as maiores médias. A subsolagem do Tecnosolo foi suficiente para promover menores valores de resistência do solo à penetração, o que reflete no aumento do DNS e na altura média das mudas.

Palavras-chave: Bolas de sementes. Banco de sementes do solo. Compactação do solo.

ABSTRACT

ALVES, William Victor Lisboa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2022. **Forest restoration in areas affected by the mining tailings of the Fundão dam, Minas Gerais, Brasil.** Advisor: Sebastião Venâncio Martins. Co-advisor: Pedro Manuel Villa.

Since the failure of the Fundão dam in Mariana, Minas Gerais, several ecological restoration practices have been carried out to recover plant communities and soil properties. In this context, the present study evaluated the process and alternative techniques of ecological restoration in areas affected by the Fundão dam tailings in the Rio Doce basin. First, we evaluate the use of seed balls as an alternative technique for forest restoration using different substrates. Thus, the treatments used were: R3: Tailings (3 cm of diameter seed ball, DSB), R6: Tailings (6 cm DSB), RCO3: Tailings + Organic Compost (3 cm DSB), RCO6: Tailings + Organic Compost (6 cm DSB), RCA3: Tailings + Clay (3cm DSB), RCA6: Tailings + Clay (6 cm DSB), RFC3: Tailings + Coal Fine (3 cm DSB) and RFC6: Tailings + Coal Fine (6 cm DSB). Inside each ball, 20 seeds distributed in four native trees species were added (five seeds for each species used). The seed balls were kept in the nursery of the Federal University of Viçosa, being monitored weekly for seed germination until 100 days after starting the experiment. A total of 540 germinated seeds were registered, belonging to the four species and the eight treatments. Smaller diameter balls showed better germination rates compared to their substrate pairs. In addition, the highest average germination values were achieved by RFC3. In this context, the seed ball technique proved to be a viable alternative for the restoration of areas affected by tailings. Second, we evaluate the soil seed bank in affected areas of mining tailings under restoration in Barra Longa, Minas Gerais. Thus, three environments were defined according to the surrounding landscape: Environment I – close to the pasture, Environment II – intermediate (between pasture and forest), Environment III – close to the forest. In each environment, 30 samples were collected, placed on a bench under shade (50%) and evaluated for nine months at the research nursery at the Federal University of Viçosa. In the three environments, a predominance of native tree species was observed, belonging to pioneers with herbaceous habits, and anemochory dispersal syndrome. Regarding the total number of individuals in the three environments, there was also a dominance of pioneers with herbaceous habits and anemochory dispersal syndrome, and native and exotic individuals represented higher proportion of the total based on origin. The results achieved in this study highlight the importance of active forest restoration through the

planting of native seedlings in these areas, and the need for a good monitoring program to ensure the restoration projects success. Third, we evaluate the effect of soil preparation techniques (subsoiling or not) on soil penetration resistance and growth parameters of native seedlings in restoration plantations on the mining tailings in Barra Longa, Minas Gerais. Thus, 28 permanent plots were systematically installed, being 14 in an area where subsoiling of the soil was performed and 14 in an area without subsoiling of the soil, these being the two treatments considered. Between the 4th and 15th month after planting the seedlings, three evaluations were carried out, where data on height and diameter at ground level of the seedlings located within the plots were collected. Then, the increments in height and diameter at ground level for the treatments were measured. Furthermore, data on soil resistance to penetration in two distinct seasons (dry/rainy) were also collected. Significant differences were found between the means of soil penetration resistance within treatments and between treatments, considering the two periods evaluated. The average values obtained, in descending order, were: Planting holes – Dry: 1124.6 kPa; Planting holes – Rain: 750.1 kPa; Subsoiling – Dry: 543.5 kPa; Subsoiling – Rain: 245.3 kPa. Significant differences were also observed when analyzing the increments in height and diameter at ground level between treatments over time, with the Subsoiling treatment showing the highest averages. Subsoiling the soil is sufficient to promote lower values of soil resistance to penetration, which reflects in the increase in diameter at ground level and in the average height of the seedlings.

Keywords: Seed balls. Soil seed bank. Soil compaction.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1**- Adição das sementes no interior das bolas de substrato (a) e medição com paquímetro do diâmetro das bolas de sementes já confeccionadas (b). Laboratório de Restauração Florestal (LARF-UFV).23
- Figura 2** – Detalhe da bandeja com as bolas de sementes sobre o rejeito (a) e alocação das bandejas sobre as bancadas (b). Casa de vegetação, Viveiro UFV.24
- Figura 3** - Evolução da média de sementes germinadas por tratamento ao longo das avaliações.....25
- Figura 4** - Total de sementes germinadas por tratamento ao final das avaliações.26
- Figura 5** - Bandejas com rejeito coberto pelas plântulas oriundas das bolas de sementes. Casa de vegetação, Viveiro UFV.28
- Figura 6** - Localização da área do estudo, no município de Barra Longa, MG, com destaque para os três ambientes analisados.35
- Figura 7** - Amostras do banco de sementes na casa de vegetação do Laboratório de Restauração Florestal, viveiro UFV.....36
- Figura 8** - Diagrama de Venn para demonstrar as espécies compartilhadas entre os bancos de sementes dos ambientes avaliados.....41
- Figura 9** - Distribuição do grupo sucessional em relação ao total de espécies (a) e indivíduos (b); e distribuição da origem das espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área próxima à pastagem em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Onde P = pioneira, Si = secundária inicial e Nc = não classificada.....42
- Figura 10** - Distribuição das espécies (a) e indivíduos (b) quanto ao hábito de vida; e síndrome de dispersão de sementes em relação ao total de espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área próxima à pastagem em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Nc = não classificada.....42
- Figura 11** - Distribuição das espécies (a) e indivíduos (b) em relação ao grupo sucessional; e distribuição da origem das espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área entre a mata e a pastagem em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Onde P = pioneira, Si = secundária inicial e Nc = não classificada.44
- Figura 12** - Distribuição quanto ao hábito de vida das espécies (a) e dos indivíduos (b); e síndrome de dispersão de sementes em relação ao total de espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área entre a mata e a pastagem em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Nc = não classificada.45

Figura 13 - Distribuição das espécies (a) e indivíduos (b) em relação ao grupo sucessional; e distribuição da origem das espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área próxima à mata em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Onde P = pioneira, Si = secundária inicial e Nc = não classificada.	46
Figura 14 - Distribuição quanto ao hábito de vida das espécies (a) e dos indivíduos (b); e síndrome de dispersão de sementes em relação ao total de espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área próxima à mata em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Nc = não classificada.	47
Figura 15 - Composição florística de espécies para os três ambientes mediante NMDS para os três ambientes.....	48
Figura 16 - Índices de rarefação para diversidade das amostras dos três ambientes, em que 0 = riqueza, 1 = Índice de Shannon-Wiener e 2 = Índice de Simpson.....	49
Figura 17 - Localização da área do estudo, no município de Barra Longa, MG, com destaque colorido dos tratamentos com e sem subsolagem.....	62
Figura 18 - Uma das áreas em restauração com plantio de mudas em área total, Barra Longa, MG.....	63
Figura 19 - Valores médios de resistência do solo à penetração obtidos durante os períodos chuvoso e seco para os tratamentos Subsolagem (a) e Covas (b).....	66
Figura 20 - Valores médios de resistência do solo à penetração obtidos para os tratamentos Subsolagem e Covas durante as estações: seca (a) e chuvosa (b).....	67
Figura 21 - Diferenças nas médias de DNS (a) e altura (b) ao longo do tempo para os dois tratamentos analisados.	68
Figura 22 - Diferenças nas médias de altura (a) e DNS ao longo do tempo dentro dos próprios tratamentos.....	70

SUMÁRIO

1. Introdução Geral	13
2. Referências Bibliográficas	16
Capítulo I: Bolas de sementes para restauração de áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão em Mariana, MG: uma inovação na restauração florestal	18
1. Introdução	20
2. Material e Métodos	22
3. Resultados e discussão	25
4. Considerações finais	28
5. Referências Bibliográficas	29
Capítulo II: Banco de sementes do solo de três ambientes em uma área atingida pelo rejeito da barragem de Fundão em processo de restauração florestal no município de Barra Longa, Minas Gerais, Brasil	31
1. Introdução	33
2. Material e Métodos	34
2.1. Área de Estudo	34
2.2. Amostragem e condução do experimento	35
2.3. Avaliação do banco de sementes	37
2.4. Análise de dados	37
3. Resultados	38
3.1. Banco de Sementes do Ambiente I	41
3.2. Banco de Sementes do Ambiente II	43
3.3. Banco de Sementes do Ambiente III	45
3.4. Composição, riqueza e diversidade de espécies	48
4. Discussão	49
4.1. Composição, riqueza e diversidade de espécies	49
4.2. Banco de Sementes do Ambiente I	51
4.3. Banco de Sementes do Ambiente II	51
4.4. Banco de Sementes do Ambiente III	52
5. Conclusões	53
6. Referências Bibliográficas	54
Capítulo III: Efeito de técnicas de preparo do solo sobre plantio de restauração florestal em áreas sobre influência de rejeito, no município de Barra Longa, Minas Gerais, Brasil	58
1. Introdução	60

2.	Material e Métodos	61
2.1.	Área de estudo	61
2.2.	Plantio das mudas e preparo do solo.....	62
2.3.	Monitoramento dos plantios	63
2.4.	Avaliação da resistência do solo à penetração.....	64
2.5.	Análise dos dados	64
3.	Resultados.....	65
3.1.	Resistência do solo à penetração	65
3.2.	Incrementos em DNS e altura.....	67
4.	Discussão	70
5.	Conclusões.....	73
6.	Referências Bibliográficas.....	74
7.	Considerações finais	78
ANEXO	79

1. Introdução Geral

As florestas contribuem na atenuação dos efeitos das mudanças climáticas, na manutenção do ciclo hidrológico das bacias hidrográficas, na conservação da fauna, e possibilitam também o uso sustentável de seus recursos através do fornecimento de diversos produtos madeireiros e não madeireiros para o ser humano (MARTINS, 2018a). Entretanto, de acordo com os dados da FAO (2020), 178 milhões de hectares de áreas florestais foram degradadas em todo o mundo nos últimos trinta anos e apesar do aumento dos esforços globais para frear o desmatamento, a cobertura florestal segue diminuindo, fazendo com que as atividades de restauração sejam cada vez mais solicitadas (LÖF et al., 2019).

A restauração visa retornar um ecossistema degradado o mais próximo possível de suas condições originais, sempre considerando um ecossistema de referência, parâmetros estruturais e uma diversidade mínima, respeitando a diversidade natural dos ecossistemas (NERY et al., 2013; MARTINS et al., 2015). A restauração de ecossistemas degradados representa uma prioridade de interesse mundial, com a finalidade de recuperar e incrementar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos em diferentes contextos socioecológicos e socioeconômicos (MENZ et al., 2013; JACOBS et al., 2015). Estas atividades de restauração têm demandado milhões de dólares para investimentos em diferentes métodos, tecnologias, e programas de gestão, porém, ainda é necessário seguir calibrando métodos para atingir as metas propostas na escala global (FAO, 2020).

Existem inúmeras técnicas de restauração ecológica que podem ser utilizadas para recuperar um ambiente degradado. A recuperação ideal de um ambiente está relacionada com a escolha de técnicas devidamente adequadas, escolhas essas que dependem de estudos que possam auxiliar e informar aos profissionais envolvidos sobre quais decisões tomar em seus projetos de restauração (TRENTIN et al., 2018). A definição da técnica de restauração deve estar relacionada com as características do local, como clima, diversidade local, condições edáficas e de umidade do solo, proximidade das fontes de propágulos, interação com a fauna e flora, tipo e intensidade do distúrbio sofrido, entre outras características, que vão influenciar diretamente no sucesso do projeto de restauração ecológica (MARTINS et al., 2015).

Deste modo, a restauração pode ser realizada mediante o uso de diferentes métodos ou técnicas (plantio de mudas, semeadura direta, núcleos de diversidade, transposição de *topsoil*, uso de poleiros, regeneração natural, entre outras), que podem ser utilizadas de forma isolada, ou em conjunto, dependendo das características ambientais do local, do tipo e da intensidade do distúrbio sofrido, assim como as condições da paisagem na qual a área está estabelecida,

como mencionado anteriormente (MARTINS, 2014; WEERASINGHE et al., 2018). É importante considerar que nem todos os projetos de restauração ecológica conseguem atingir os objetivos propostos relacionados com a recuperação de ecossistemas afetados, e avaliar o sucesso da restauração é essencial para a definição de técnicas de manejo visando atingir os objetivos propostos (GANDOLFI et al., 2009; WORTLEY et al., 2013).

Atualmente no Brasil os principais programas de restauração ecológica estão focados principalmente para reabilitar e recuperar áreas degradadas devido aos impactos ambientais negativos oriundos da má conservação e manejo do uso do solo. Assim, torna-se necessário adaptar os projetos de restauração florestal aos diferentes tipos de condições ambientais, locais e regionais, que podem contribuir ou interferir no avanço do processo de restauração ecológica (MARTINS, 2018b). Dessa maneira, o uso de diferentes métodos alternativos de restauração ativa através da nucleação (transposição de serapilheira, banco de sementes, poleiros, núcleos de diversidade, etc.) ou passiva pela regeneração natural, podem ser utilizados simultaneamente durante o processo de recuperação de áreas degradadas (CROUZEILLES et al., 2017; HOLL, 2017).

O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, ocorreu no dia 05 de novembro de 2015. A barragem, pertencente ao complexo de Germano, armazenava cerca de 50 milhões de m³ de rejeitos de mineração de ferro, dos quais aproximadamente 34 milhões de m³ foram liberados com o rompimento, afetando mais de 660 km de cursos d'água na bacia do Rio Doce, incluindo os estados de Minas Gerais e Espírito Santo (MMA, 2016). Os impactos causados pelo rompimento da barragem de Fundão podem ser agrupados em dois grupos: a montante e a jusante da usina hidrelétrica Risoleta Neves (Candongia), uma vez que grande parte do rejeito permaneceu nos 120 km iniciais, sendo retidos pela usina (CARMO et al., 2017). A maior perda de vegetação se concentrou nos locais mais próximos ao rompimento da barragem, nos municípios de Mariana e Barra Longa (SOS MATA ATLÂNTICA, 2017).

A histórica condição ambiental da bacia do Rio Doce, que fora bastante antropizada, aliada ao acidente ambiental, dificultam a capacidade de resiliência da bacia. Mesmo antes do rompimento da barragem de Fundão, a bacia do Rio Doce já se encontrava em um estágio de degradação provocado por fatores antrópicos, como desmatamento, uso inadequado do solo e outros fatores que alteraram o regime natural das águas e potencializaram impactos climáticos, dificultando ainda mais a sua recuperação (SOS MATA ATLÂNTICA, 2017). Cerca de 98% da área da bacia do Rio Doce está inserida no bioma Mata Atlântica, que é considerado um dos *hotspots* mundiais para conservação da biodiversidade (OMACHI et. al, 2018).

Buscando reparar os impactos socioambientais causados pelo acidente, foi firmado entre os órgãos públicos dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e as empresas responsáveis pela gestão da barragem, o Termo de Transação e Ajustamento de Conduta (TTAC), onde foram descritas diversas atividades a serem desenvolvidas, dentre elas a restauração de 40 mil ha de APP's ao longo de toda a bacia do Rio Doce (BRASIL, 2016). No entanto, sabe-se que restaurar as mais diversas vegetações existentes, sobretudo em larga escala, é uma tarefa muito complexa, devido a diversos fatores que conferem particularidades a cada ambiente (GUERIN et al., 2015).

Neste contexto o presente estudo buscou avaliar o processo e técnicas alternativas de restauração ecológica nas áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão e outras áreas da bacia do Rio Doce. Os resultados deste trabalho irão auxiliar na tomada de decisões sobre a melhor forma de intervenção nestas áreas, sendo uma importante ferramenta de apoio a políticas públicas de restauração e de monitoramento, visando não apenas minimizar os impactos ambientais provocados pelo rompimento da barragem, mas também contribuir para a restauração dos ecossistemas florestais na bacia do Rio Doce.

Cabe destacar que devido ao estado de degradação já anterior ao rompimento da barragem de Fundão e com o programa em curso de restauração florestal em larga escala, a bacia do Rio Doce terá um ganho ambiental, representado pelo aumento da cobertura de florestas nativas, particularmente nas APPs que outrora estavam ocupadas por pastagens e outras formas de uso antrópico.

2. Referências Bibliográficas

- BRASIL. **Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta**. Dispõem sobre acordo entre o Governo Federal, Governo do estado de Minas Gerais, Governo do estado Espírito Santo e as mineradoras Samarco Mineração S/A, Vale S/A e BHP Billiton Brasil Ltda. Brasília, 2016.
- CARMO, Flávio Fonseca do; KAMINO, Luciano Hiromi Yoshino; JUNIOR, Rogério Tobias; DE CAMPOS, Iara Christina; CARMO, Felipe Fonseca; SILVINO, Guilherme; ... & PINTO, Carlos Eduardo Ferreira. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.
- CROUZEILLES, Renato; FERREIRA, Mariana S., CHAZDON, Robin L.; LINDENMAYER, David B.; SANSEVERO, Jerônimo B.; MONTEIRO, Lara; ... & STRASSBURG, Bernardo B. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. **Science advances**, v. 3, n. 11, p. e1701345, 2017.
- FAO, Food and Agriculture Organization. The state of the world's forests 2020 — forest pathways to sustainable development. Rome, 2020.
- GANDOLFI Sergius; BELOTTO Andrezza, RODRIGUES; Ricardo Ribeiro. 2009. Inserção do conceito de grupos funcionais na restauração, baseada no conhecimento da biologia das espécies. In: RODRIGUES Ricardo Ribeiro; BRANCALION, Pedro Henrique Santin; ISERNHAGENN, Ingo. (Eds.) **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: Lerf/Esalq, Instituto BioAtlântica. p.62-85, 2009.
- GUERIN Natália; ISERNHAGENN, Ingo; VIEIRA, Daniel Luís Mascia; CAMPOS-FILHO, Eduardo Malta; & CAMPOS, Rodrigo Junqueira Barbosa. Avanços e próximos desafios da semeadura direta para restauração ecológica. In: MARTINS, Sebastião Venâncio. (Ed.) **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**. Viçosa: Editora UFV, 2ª Ed, p. 331 – 376, 2015.
- HOLL, Karen D. Restoring tropical forest. **Nature Education Knowledge**, v. 4, n. 4, p. 4, 2013.
- HOLL, Karen D. Research directions in tropical forest restoration. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 102, n. 2, p. 237-250, 2017.
- JACOBS, Douglass F.; OLIET, Juan A.; ARONSON, James; BOLTE, Andreas; BULLOCK, James M.; DONOSO, Pablo J.; ... & WEBER, John C. Restoring forests: what constitutes success in the twenty-first century?. **New Forests**, v. 46, n. 5, p. 601-614, 2015.
- LÖF, Magnus; MADSEN Palle; METSLAID Marek; WITZELL Johanna; & JACOBS Douglas F. Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. **New Forests**, v. 50, n. 2, p. 139-151, 2019.
- MARTINS, Sebastião Venâncio. Recuperação de matas ciliares: no contexto do Novo Código Florestal. **Viçosa: Editora Aprenda Fácil**, 3º Ed. 220p. 2014.
- MARTINS, Sebastião Venâncio, MIRANDA NETO Aurino; & RIBEIRO, Tiago Maciel. Uma abordagem sobre diversidade e técnicas de restauração ecológica. In: MARTINS, Sebastião Venâncio. (Ed.) **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**. Viçosa: Editora UFV, 3ª Ed, p. 19-41. 2015.
- MARTINS, Sebastião Venâncio. Restauração Florestal. Boletim de Extensão. Viçosa: **Editora UFV**, v. 67, p. 1-19. 2018a.

- MARTINS, Sebastião Venâncio. Alternative forest restoration techniques. In: VIANA, Helder; & GARCIA-MOROTE; Francisco Antônio. (Eds.) **New perspectives in forest science**. London, IntechOpen, 2018, p.131-148. 2018b.
- MENZ, Myles H.M.; DIXON, Kingsley W.; HOBBS, Richard J. Hurdles and opportunities for landscape-scale restoration. **Science**, v. 339, n. 6119, p. 526-527, 2013.
- MMA, Ministério do Meio Ambiente. Compreender o acidente de Mariana e suas consequências para o meio ambiente. 2016. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/12/entendao-acidente-demariana-e-suas-consequencias-para-o-meio-ambiente>.
- NERY, Emanuela Rodrigues Amorim; SARAIVA, Camila Silva; CRUZ, Leonídia Maria Serretti; SOUZA, Maíra Miele Oliveira Rodrigues; GOMES, Francisco Sanches EL-HANI, Charbel Ninõ; & MARIANO-NETO; Eduardo. O conceito de restauração na literatura científica e na legislação brasileira. **Revista Caititu, Salvador**, v. 1, n. 1, p. 43-56, 2013.
- OMACHI, Claudia Y.; SIANI, Sacha; CHAGAS, Felipe M.; MASCAGNI, Mario L.; CORDEIRO, Marcelle; GARCIA, Gizele D.; ... & THOMPSON, Fabiano L. Atlantic Forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil). **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 12, p. 30-34, 2018.
- SOS Mata Atlântica. **Observando os Rios 2017: o retrato da qualidade da água na bacia do Rio Doce após dois anos do rompimento da barragem de Fundão**. SOS Mata Atlântica, INPE, Arcplan, 2017. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2015-2016, Fundação SOS Mata Atlântica e Instituto de Pesquisas Espaciais. 2017.
- TRENTIN, Bruna Elisa; ESTEVAN, Daniela Aparecida; ROSSETTO, Elson Felipe Sandoli; GORENSTEIN, Mauricio Romero; BRIZOLA, Gimar Poser; & BECHARA, Fernando Campanhã. Restauração florestal na Mata Atlântica: passiva, nucleação e plantio de alta diversidade. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 160-174, 2018.
- WEERASINGHE, Madhushi; ASTHON, Mark S.; HOOPER, Elaine R. SINGHAKUMARA, Balagoda M. P. Floristics of soil seed banks on agricultural and disturbed land cleared of tropical forests. **Restoration ecology**, v. 27, n. 1, p. 138-147, 2019.
- WORTLEY, Liana; HERO, Jean-Marc; HOWES, Michael. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. **Restoration ecology**, v. 21, n. 5, p. 537-543, 2013.

Capítulo I: Bolas de sementes para restauração de áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão em Mariana, MG: uma inovação na restauração florestal

Publicado em: MARTINS, Sebastião Venâncio; ALVES, William Victor Lisboa; VILLA, Pedro Manuel; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida. Bolas de sementes com rejeito da barragem de fundão: uma inovação na restauração florestal das áreas atingidas na região de Mariana, MG. In: OLIVEIRA, Robson Jodé. (Org). **Gestão de Resíduos e a Elaboração de Bioprodutos para Uso na Agricultura: pesquisa e aplicação**. 1ed. Guarujá, SP: Editora Científica Digital, 2021, p. 61-72. ([pdf](#))

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de bolas de sementes como técnica alternativa para a restauração florestal de áreas atingidas pelo rejeito da barragem de Fundão. Para tanto, foram confeccionadas bolas que diferiam de acordo com o substrato – rejeito, composto orgânico, argila e fino de carvão, e também pelo diâmetro utilizado – 3 e 6 cm. Assim, os tratamentos utilizados foram: R3: Rejeito (bola de 3 cm de diâmetro), R6: Rejeito (6 cm), RCO3: Rejeito + Composto Orgânico (3 cm), RCO6: Rejeito + Composto Orgânico (6 cm), RCA3: Rejeito + Argila (3cm), RCA6: Rejeito + Argila (6 cm), RFC3: Rejeito + Fino de Carvão (3 cm) e RFC6: Rejeito + Fino de Carvão (6 cm). Dentro de cada bola foram adicionadas 20 sementes de espécies arbóreas nativas de ocorrência na bacia do Rio Doce, sendo 5 de cada uma das quatro espécies utilizadas (*Peltophorum dubium*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Ceiba speciosa* e *Colubrina glandulosa*). As bolas de sementes foram mantidas em estufa no viveiro da Universidade Federal de Viçosa, sendo monitoradas semanalmente quanto a germinação das sementes até 100 dias após a montagem do experimento. Foram contabilizadas um total de 540 sementes germinadas, pertencentes às quatro espécies e aos oito tratamentos. Constatou-se que as bolas de menores diâmetros obtiveram melhores taxas de germinação em comparação aos seus pares de substratos. Além disso, os maiores valores médios de germinação foram alcançados por RFC3. Nesse contexto, a técnica de bolas de sementes se mostrou uma alternativa viável para restauração das áreas atingidas por rejeito.

Palavras-chaves: Técnicas Alternativas, Recuperação de Áreas Degradadas, Enriquecimento florestal, Espécies nativas.

Chapter I: Seed balls for restoration of areas affected by tailings from the Fundão dam in Mariana, MG: an innovation in forest restoration.

Published on: MARTINS, Sebastião Venâncio; ALVES, William Victor Lisboa; VILLA, Pedro Manuel; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida. Seed balls for restoration of areas affected by tailings from the Fundão dam in Mariana, MG: an innovation in forest restoration. In: OLIVEIRA, Robson José. (Org). **Gestão de Resíduos e a Elaboração de Bioprodutos para Uso na Agricultura: pesquisa e aplicação**. 1ed. Guarujá, SP: Editora Científica Digital, 2021, p. 61-72.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the use of seed balls as an alternative technique for the forest restoration of areas affected by the tailings of the Fundão dam. For this purpose, balls were made with different substrates – tailings, organic compost, clay and fine coal, and also by the diameter used – 3 and 6 cm. Thus, the treatments used were: R3: Tailings (3 cm diameter ball), R6: Tailings (6 cm), RCO3: Tailings + Organic Compost (3 cm), RCO6: Tailings + Organic Compost (6 cm), RCA3: Tailings + Clay (3cm), RCA6: Tailings + Clay (6 cm), RFC3: Tailings + Coal Fine (3 cm) and RFC6: Tailings + Coal Fine (6 cm). Within each ball, 20 seeds of native tree species occurring in the Rio Doce basin were added, 5 of each of the four species used (*Peltophorum dubium*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Ceiba speciosa* and *Colubrina glandulosa*). The seed balls were kept in a greenhouse at the nursery of the Federal University of Viçosa, being monitored weekly for seed germination until 100 days after the experiment was set up. A total of 540 germinated seeds were counted, belonging to the four species and eight treatments. It was found that smaller diameter balls obtained better germination rates compared to their substrate pairs. In addition, the highest mean germination values were achieved by RFC3. In this context, the seed ball technique proved to be a viable alternative for the restoration of areas affected by tailings.

Keywords: Alternative Techniques, Recovery of Degraded Areas, Forest Enrichment, Native Species.

1. Introdução

Para reverter os impactos provocados pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, ocorrido em 05 de novembro de 2015, a Fundação Renova e seus parceiros têm realizado um grande investimento tanto em ações diretas de reabilitação e restauração florestal das áreas atingidas e de áreas de compensação em toda a bacia do Rio Doce, nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Entre as ações implementadas, está a restauração de 40 mil ha de áreas de preservação permanente (APP's) ao longo de toda a bacia do Rio Doce, que é considerada uma importante meta para recuperação desta bacia, que historicamente já sofria com a degradação ambiental muito antes do rompimento da barragem. Assim, a restauração ao longo das áreas atingidas pelo rejeito depende das características ambientais específicas de cada local e o nível de impacto gerado pela deposição do rejeito, o que também determina a escolha da técnica de restauração a ser utilizada (Martins, 2016). Desta forma, o sucesso dos projetos de restauração dessas áreas, deve se dar pela adoção de práticas que visem a recuperação da biodiversidade e serviços ecossistêmicos, e que estejam alinhados às condições específicas de cada área (Martins et al., 2015; 2020a, 2020b).

A restauração ativa por plantio de mudas de árvores em todas as áreas onde a restauração passiva por meio da regeneração natural é limitada, é também conhecido como reflorestamento tradicional, muito aplicado nos últimos anos na restauração em larga escala (Martins, 2018). Entretanto, existem outras técnicas, como a nucleação, que consiste no estabelecimento e manejo de núcleos vegetais em áreas degradadas a partir da transposição de bancos de sementes de ecossistemas conservados para promover a recuperação natural (Martins, 2018). Além do plantio tradicional e nucleação, existem outras técnicas alternativas de restauração ativa tais como semeadura direta, plantio de enriquecimento, transplante de plântulas, sistemas agroflorestais, entre outras (Oliveira & Engel 2017; Martins, 2018; Martins et al. 2020a, 2020b).

De acordo com Martins et al. (2015), existem áreas em que realmente o reflorestamento tradicional deve ser indicado, como em áreas agrícolas que perderam totalmente a resiliência. Entretanto, existem áreas em que outras técnicas podem ser indicadas como exclusivas ou até como complementares para aumentar a biodiversidade dos próprios reflorestamentos tradicionais (Martins et al. 2020a, 2020b). Nesse contexto, a semeadura direta de espécies arbóreas nativas, tem sido utilizada em projetos de restauração (ex, Campanharo et al. 2020, 2021; Martins et al. 2020b).

A semeadura direta tem sido indicada sobretudo por apresentar menor custo em relação ao plantio de mudas, utilização de maiores densidades de indivíduos por unidade de área, organização espacial mais próxima ao de florestas naturais e promoção das relações interespecíficas, como facilitação e competição (Guerin et al., 2015). Em contrapartida, a técnica também apresenta algumas desvantagens, como as baixas taxas de germinação, variabilidade e dificuldade de controlar as condições de germinação em campo, a predação de sementes e mudas e a competição com espécies já presentes (Ceccon et al., 2015).

Nesse contexto, as bolas de sementes (*seed balls*) surgem como uma técnica de semeadura direta, que vem sendo utilizada desde o século passado, majoritariamente na agricultura e jardinagem em diferentes países (Fukouoka, 2009). As bolas de sementes geralmente são compostas de argila, fibra, e húmus, além de água para dar aderência, e vem sendo sugeridas para promover melhores condições de germinação das sementes, retendo a umidade e facilitando o crescimento por meio de enriquecimento de nutrientes, além de eliminar a predação de sementes e poder fornecer um banco de sementes persistente (Jones et. al, 2014).

As bolas de sementes podem conter em sua composição outros materiais além de água, argila e solo, como fertilizantes que auxiliem na germinação e estabelecimento das sementes (Gornish et al., 2019). Além disso, essa técnica permite conciliar espécies com diferentes funções ecológicas em um mesmo núcleo, simulando condições que ocorrem naturalmente. As técnicas de revestimento de sementes, como as bolas de sementes, são consideradas alternativas e complementares à restauração de áreas degradadas, principalmente em áreas de difícil acesso, se destacando por serem técnica de mais baixo custo em relação ao plantio de mudas (Jones et al., 2014; Holbert & Sudrajat, 2019; Gornish et al., 2019).

No Brasil, em áreas onde o plantio de mudas é praticamente inviável devido as condições do terreno (declividade, acesso, entre outros) e também como técnica de enriquecimento de áreas em processo de restauração, as bolas de sementes aparecem como uma boa alternativa. Apesar do potencial para uso na restauração florestal, não existem estudos que comprovem a eficiência do uso de bolas de sementes para esta finalidade no país.

Por intermédio de uma parceria iniciada em 2018 entre a Fundação Renova e o Laboratório de Restauração Florestal (LARF), diversas pesquisas vêm sendo realizadas visando contribuir para o programa de restauração florestal das áreas atingidas pelo rompimento da barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais. Uma das pesquisas mais recentes e inovadoras desta parceria foi o desenvolvimento de uma nova tecnologia de semeadura de espécies arbóreas nativas, denominada de bolas de sementes.

Bolas de sementes são conglomerados de substrato que envolvem as sementes com a finalidade de protegê-las até que as condições ambientais sejam favoráveis à germinação, e apresentam como principais vantagens à sementeira direta tradicional: a proteção das sementes do ataque de predadores e o oferecimento de condições mais adequadas para a germinação e estabelecimento das plântulas nos períodos iniciais (Jones et al., 2014). Nesse sentido, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o uso de bolas de sementes como técnica alternativa para promover a germinação e estabelecimento de espécies arbóreas potenciais para a restauração florestal de áreas atingidas pelo rejeito.

2. Material e Métodos

Nesse estudo, foi avaliado o uso do próprio rejeito da barragem de Fundão, puro e em mistura com outros substratos na confecção das bolas de sementes, visando o reaproveitamento do rejeito para a restauração das áreas diretamente atingidas e outras áreas na bacia do Rio Doce. O experimento foi conduzido em ambiente controlado na casa de vegetação do LARF no viveiro da UFV, onde foram testadas bolas de sementes com quatro substratos e dois diâmetros diferentes. Na definição dos tratamentos, além do rejeito (presente em todos os tratamentos), foram escolhidos mais três substratos, sendo eles: argila, composto orgânico e fino de carvão. Os substratos são de fácil obtenção na região, o que influenciou na escolha destes. Assim, acredita-se que a técnica possa ser uma opção para uso na restauração da bacia do Rio Doce, possibilitando a participação ativa dos produtores rurais com trabalho e geração de renda (Raupp et al., 2020).

Em relação ao diâmetro das bolas foram definidas duas classes de tamanho: bolas pequenas, de 3 cm de diâmetro, e bolas grandes, de 6 cm de diâmetro. Visando a padronização das repetições, após a confecção das bolas, todas tiveram o diâmetro conferido com um paquímetro. Além disso, na seleção das espécies a serem utilizadas, optou-se pela escolha de quatro espécies arbóreas nativas que ocorrem na bacia do Rio Doce, sendo duas classificadas como espécies pioneiras: canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) e tamboril (*Enteolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong), e duas classificadas como espécies não pioneiras: paineira (*Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna) e sobrasil (*Colubrina glandulosa* Perkins) (Barbosa, 2017).

Na confecção das bolas foram incorporadas 5 sementes de cada uma das quatro espécies utilizadas, totalizando 20 sementes por bola (Figura 1). Todas as sementes utilizadas no experimento foram adquiridas de fornecedores de procedência e se encontravam viáveis. Para as espécies que apresentam algum tipo de dormência, foi realizada a quebra da mesma, con-

forme instruções do fornecedor. As sementes de *Colubrina glandulosa* e *Peltophorum dubium* foram emergidas em água em temperatura ambiente por 24 horas, e para as sementes de *Enteolobium contortisiliquum* foi realizada a escarificação mecânica com lixa.

Para a adubação das bolas de sementes, foi definida a adição de 10 gramas de fertilizante NPK (06-30-06) para cada quilo de substrato utilizado, visando fornecer melhores condições nutricionais nos estágios iniciais da germinação e fase inicial de crescimento. Além disso, para a confecção das bolas ainda foi necessária a utilização de água para dar aderência da semente ao substrato.

Figura 1- Adição das sementes no interior das bolas de substrato (a) e medição com paquímetro do diâmetro das bolas de sementes já confeccionadas (b). Laboratório de Restauração Florestal (LARF-UFV).



(a)

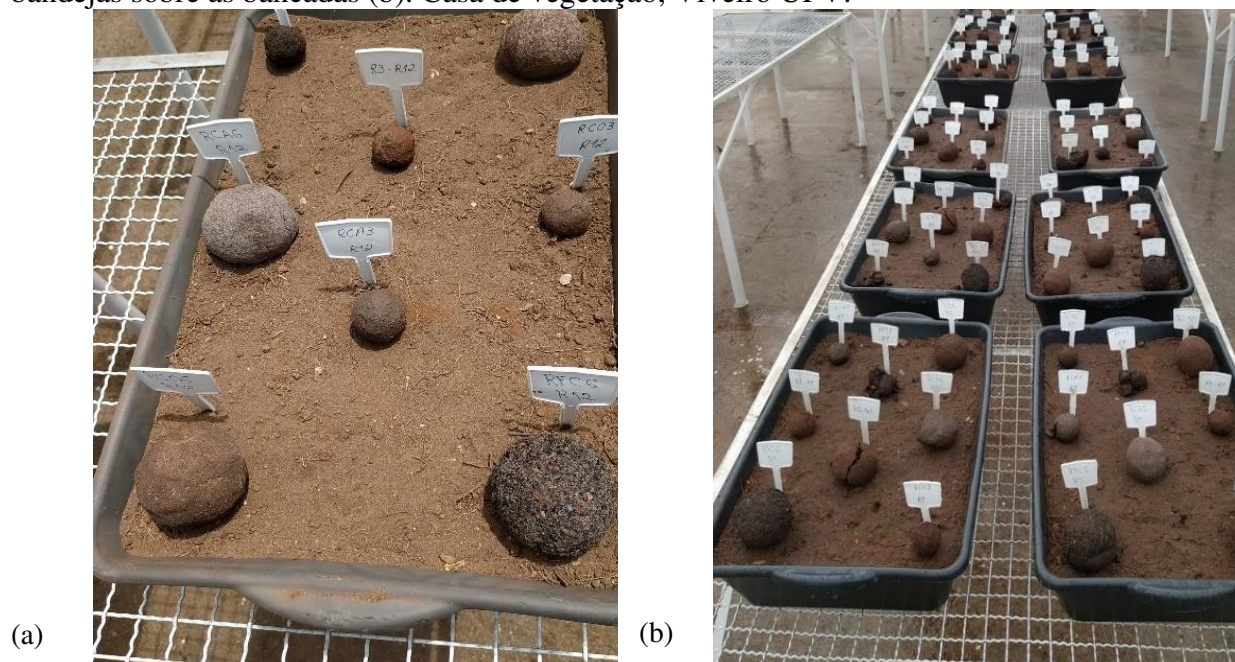


(b)

As bolas foram confeccionadas em laboratório e levadas para a casa de vegetação da UFV. Foram confeccionadas doze bolas (repetições) para cada um dos oito tratamentos definidos: R3: Rejeito (bola de 3 cm de diâmetro), R6: Rejeito (6 cm), RCO3: Rejeito + Composto Orgânico (3 cm), RCO6: Rejeito + Composto Orgânico (6 cm), RCA3: Rejeito + Argila (3cm), RCA6: Rejeito + Argila (6 cm), RFC3: Rejeito + Fino de Carvão (3 cm) e RFC6: Rejeito + Fino de Carvão (6 cm).

O experimento foi montado sob delineamento inteiramente casualizado, sendo utilizadas noventa e seis bolas, que foram distribuídas em doze blocos. Cada bloco foi composto por uma bandeja plástica de 20 litros, preenchida apenas com rejeito in natura, sem adubação, visando simular a situação normalmente encontrada nas áreas atingidas pelo rejeito, onde as bolas foram dispostas aleatoriamente. Após a distribuição das bolas nos blocos, todas foram devidamente identificadas e sinalizadas com o auxílio de uma placa de identificação (Figura 2).

Figura 2 – Detalhe da bandeja com as bolas de sementes sobre o rejeito (a) e alocação das bandejas sobre as bancadas (b). Casa de vegetação, Viveiro UFV.



Na casa de vegetação, as bandejas foram mantidas sobre bancadas, onde a irrigação foi programada de acordo com as condições climáticas locais, com controle de umidade realizado pela irrigação por aspersão automática. A partir da montagem do experimento, as bolas foram monitoradas e vistoriadas semanalmente. No total, foram realizadas quatorze avaliações, sendo que a primeira avaliação ocorreu sete dias e a última após noventa e nove dias da montagem do experimento. Para contabilização da germinação, as bolas foram avaliadas minuciosamente, uma a uma, tendo sido consideradas todas as sementes que emitiram radícula.

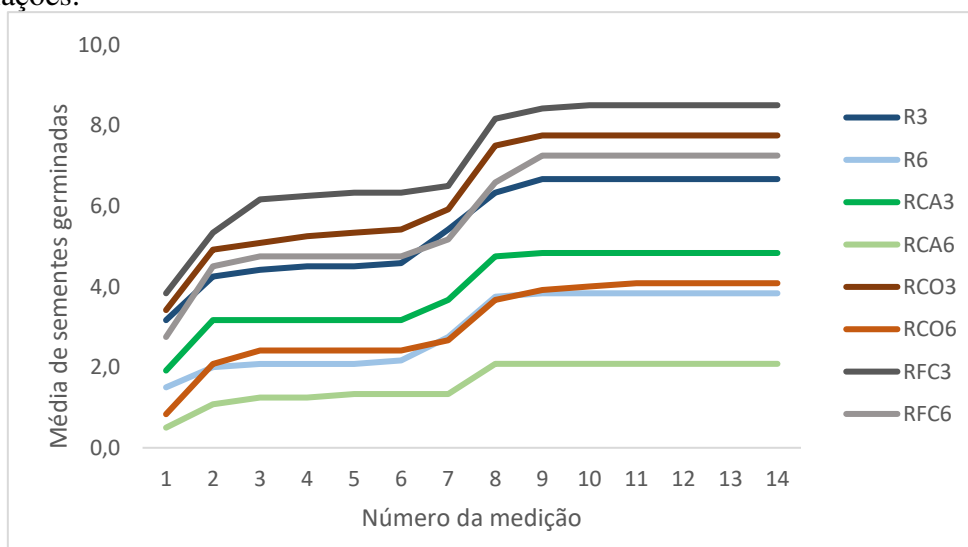
Para comparar a germinação de plântulas de cada espécie na última avaliação do experimento, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis seguido de um teste posterior de Dunn para comparar entre tratamentos (Crawley, 2013). Previamente foi testada a distribuição dos dados

de germinação de cada espécie com o teste Shapiro-Wilk e gráfico Q-Q, (Crawley, 2013). As análises estatísticas foram realizadas no programa R 3.6.0 (R CORE TEAM, 2019).

3. Resultados e discussão

Considerando as quatro espécies utilizadas, todos os tratamentos e repetições, no total foram contabilizadas 540 sementes germinadas após 100 dias da montagem do experimento. Todos os tratamentos apresentaram sementes germinadas, sendo que a germinação foi observada da primeira até a décima primeira semana de avaliação, 77 dias após a montagem do experimento. Nas primeiras semanas observou-se um predomínio de germinação de sementes de *Ceiba speciosa*, enquanto as sementes de *Enterolobium contortisiliquum* apresentaram alta na germinação somente após cerca de dois meses da montagem do experimento. A figura 3 ilustra a tendência de crescimento e estabilização (após a 11ª semana) das médias de germinação das sementes nos tratamentos utilizados.

Figura 3 - Evolução da média de sementes germinadas por tratamento ao longo das avaliações.



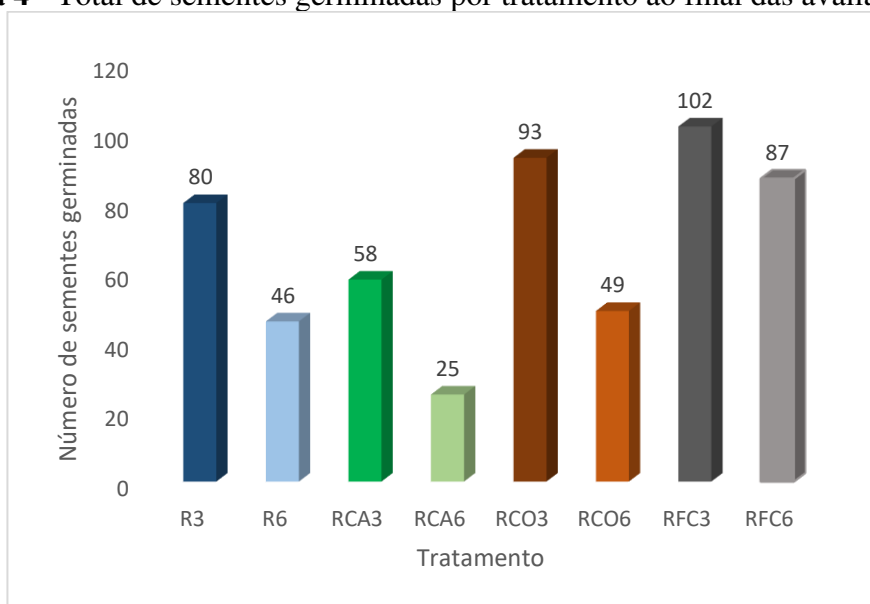
Todos os resultados de germinação das espécies deste experimento ficaram acima dos valores de emergência obtido no único trabalho encontrado com bolas de sementes, da espécie arbustiva no deserto de Mojave Desert, Estados Unidos, *Coleogyne ramosissima*, onde foi atingido 5% de germinação (Jones et al., 2014).

No presente estudo, *C. speciosa* apresentou a maior germinação, com um total de 295 sementes germinadas, seguida por *E. contortisiliquum*, com 183 sementes germinadas. Em contrapartida, *C. glandulosa* e *P. dubium* apresentaram menores valores de germinação no experimento, germinando um total de 36 e 26 sementes, respectivamente. É válido destacar

que estes valores estão sendo influenciados por vários fatores, como as interações com o ambiente, com os substratos, e entre as espécies, que reagem de diferentes maneiras.

Em relação aos tratamentos, o tratamento com RFC3 apresentou a maior quantidade média de sementes germinadas por repetição (8,5). Na sequência os tratamentos com maiores valores foram: RCO3, RFC6 e R3, que apresentaram médias de 7,8, 7,3 e 6,7 sementes germinadas por repetição, respectivamente. No total, apenas 4 bolas não apresentaram nenhuma germinação, sendo todas pertencentes ao tratamento RCO6, o que influenciou no fato deste tratamento apresentar a menor taxa de germinação. Os tratamentos com utilização de argila apresentaram média abaixo de 5 sementes germinadas, indicando que, nestas condições, a interação da argila com o rejeito, não promoveu melhores condições para germinação das sementes das espécies utilizadas. A maior taxa de germinação no tratamento RCA3 em comparação ao RCA6 confirmam que a utilização de bolas menores ou com menores teores de argila podem diminuir efeitos negativos na germinação das sementes (Jones et al., 2014).

Figura 4 - Total de sementes germinadas por tratamento ao final das avaliações.



Nota-se que as bolas com menores diâmetros se destacaram com os melhores valores médios de germinação entre os seus pares de substrato e de uma maneira geral. Das 5 maiores médias de germinação, apenas a terceira foi de um tratamento com bolas de sementes com maior diâmetro (RFC6). Além disso, a utilização de fino de carvão juntamente com o rejeito demonstrou ser uma boa alternativa para promover a germinação das sementes. Até mesmo a utilização somente do próprio rejeito, nas condições deste experimento, se mostrou uma boa opção. Devido à alta densidade de sementes utilizada, o tratamento R3, por exemplo, que teve

uma germinação média de 33%, indica que a cada bola de semente utilizada, germinaram cerca de 6 indivíduos de diferentes espécies, o que indica o potencial dessa técnica ao promover um núcleo com vários indivíduos.

Observou-se também que, ao longo das semanas, as bolas foram se abrindo e se incorporando ao rejeito utilizado nas bandejas. As plântulas oriundas das bolas enraizaram neste substrato e mantiveram bom desenvolvimento (Figura 4). Por terem sido usadas sementes de diferentes espécies que possuem diferentes características de germinação e desenvolvimento, as bolas de sementes formaram um banco de plântulas, onde na área da mesma bola, se encontravam vários indivíduos com diferentes alturas. O crescimento dessas plântulas agrupadas pode causar um efeito benéfico às sementes pela facilitação, além de promover melhorias de outros serviços ecossistêmicos (Gornish et al., 2019). Soma-se a isso também, a possibilidade de existirem sementes que ainda não germinaram, mas que se encontram viáveis, podendo formar um banco de sementes persistente nas áreas em que serão utilizadas (Jones et al., 2014).

Ao comparar o número de todas as plântulas germinadas por espécie, os resultados indicam que apenas *C. glandulosa* apresentou diferenças entre tratamentos ($\chi^2 = 28.99$, $df = 7$, $p < 0.001$), principalmente entre o tratamento RFC3 em relação aos demais. No entanto não houve diferenças entre tratamentos para as outras espécies avaliadas, *P. dubium* ($\chi^2 = 12.29$, $df = 7$, $p = 0.10$), *E. contortisiliquum* ($\chi^2 = 11.94$, $df = 7$, $p = 0.11$), e *C. speciosa* ($\chi^2 = 7.76$, $df = 7$, $p = 0.35$). Estes resultados permitem inferir que medições de germinação no nível de espécies também são importantes para avaliar a eficiência do método e dos tratamentos específicos. Assim foi possível constatar também que o tratamento RFC3 foi o mais relevante e que apresentou maiores valores médios em relação a todos os tratamentos testados, para *C. glandulosa* a qual foi mais sensível em apresentar diferenças entre tratamentos.

Figura 5 - Bandejas com rejeito coberto pelas plântulas oriundas das bolas de sementes. Casa de vegetação, Viveiro UFV.



4. Considerações finais

A técnica das bolas de sementes utilizando o próprio rejeito, puro ou com misturas de substratos, configura-se como uma alternativa muito promissora para auxiliar na restauração das áreas atingidas por rejeito e em áreas de compensação na bacia do Rio Doce, particularmente em áreas de difícil acesso, áreas com regeneração que precisam de enriquecimento, entre outras. A utilização de bolas pequenas, com cerca de 3 cm de diâmetro mostrou-se mais adequada por resultar em maiores taxas de germinação, além de serem de mais fácil transporte e lançamento manual ou via drones em áreas de difícil acesso. No entanto, para uma melhor avaliação desta técnica, é preciso que o experimento seja levado a condições de campo, o que será realizado na próxima etapa.

5. Referências Bibliográficas

Brasil. (2016). Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta. Dispõem sobre acordo entre o Governo Federal, Governo do estado de Minas Gerais, Governo do estado Espírito Santo e as mineradoras Samarco Mineração S/A, Vale S/A e BHP Billiton Brasil Ltda. Brasília, 2016.

Campanharo IF, Martins SV, Villa PM, Kruschewsky GC, Dias AA, Nabeta FH. (2021) Forest restoration methods, seasonality, and penetration resistance does not influence above-ground biomass stock on mining tailings in Mariana, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 93(1).

Campanharo IF, Martins SV, Villa PM, Kruschewsky GC, Dias AA, Nabeta FH. (2020) Effects of forest restoration techniques on community diversity and aboveground biomass on area affected by mining tailings in Mariana, Southeastern Brazil. *Research in Ecology* 2(4), 22-30.

Ceccon E, González EJ, & Martorell C. (2016). Is direct seeding a biologically viable strategy for restoring forest ecosystems? Evidences from a Meta-analysis. *Land Degradation & Development*, 27(3), 511-520.

Crawley MJ. (2012). *The R book*, 2nd edn. Wiley, London.

Fukuoka M. (2009). *The one-straw revolution: An introduction to natural farming*. New York Review of Books.

Gornish E, Arnold H, & Fehmi J. (2019). Review of seed pelletizing strategies for arid land restoration. *Restoration Ecology*, 27(6), 1206-1211.

Guerin N, Isernhagen I, Vieira DLM, Campos-Filho EM, & Campos RJB. (2015). Avanços e próximos desafios da sementeira direta para restauração ecológica. In: Martins, SV. (Ed.) *Restauração ecológica de ecossistemas degradados*. Viçosa: Editora UFV, 3ª Ed, p. 331 – 376.

Holbert J, & Sudrajat DJ. (2019). Alternative methods for reforestation and land rehabilitation to reduce the plastics waste in forest areas. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 407(1), p. 012007. IOP Publishing.

Jones LC, Schwinning S, & Esque TC. (2014). Seedling ecology and restoration of blackbrush (*Coleogyne ramosissima*) in the Mojave Desert, United States. *Restoration Ecology*, 22(5), 692-700.

Martins SV. (2016). *Recuperação de áreas degradadas: Ações em Áreas de Preservação Permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração*. Viçosa: Aprenda Fácil, 3ª Ed.

Martins SV, Miranda Neto A, & Ribeiro TM. (2015). Uma abordagem sobre diversidade e técnicas de restauração ecológica. In: Martins, SV. (Ed.) *Restauração ecológica de ecossistemas degradados*. Viçosa: Editora UFV, 3ª Ed, p. 19-41.

Martins SV. (2018). *Restauração Florestal*. Boletim de Extensão, 67, 1-19.

Martins SV, Villa PM, Balestrin D, Nabeta FH, Silva LF (2020a) Monitoring the passive and active ecological restoration of areas impacted by the Fundão tailings dam disruption in Mariana, Minas Gerais, Brazil. Pages 51-95 In: de Vliieger K. (ed), *Recent Advances in Ecological Restoration*, New York, Nova Science Publishers.

Martins SV, Villa PM, Nabeta FH, Da Silva LF, Kruschewsky GC, Dias AA (2020b) Study on site preparation and restoration techniques for forest restoration in mining tailings of Mariana, Brazil. *Research in Ecology* 2:42-52.

Oliveira RE, & Engel VL. (2017). A restauração florestal na Mata Atlântica: três décadas em revisão. *Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente*, 5 (1), 40-48.

R Core Team (2019). R version 3.6.0. In. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria.

Raupp PP, Ferreira MC, Alves M, Campos-Filho EM, Sartorelli PAR, Consolaro HN, & Vieira DLM. (2020). Direct seeding reduces the costs of tree planting for forest and savanna restoration. *Ecological Engineering*, 148, 105788.

Capítulo II: Banco de sementes do solo de três ambientes em uma área atingida pelo rejeito da barragem de Fundão em processo de restauração florestal no município de Barra Longa, Minas Gerais, Brasil.

Resumo

O objetivo deste estudo foi avaliar o banco de sementes do solo em três ambientes em restauração sobre o rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão, em Barra Longa, Minas Gerais. O estudo foi realizado em áreas impactadas pelo rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão onde estão localizados os plantios de restauração. Para a coleta do banco de sementes, foram definidos três ambientes que diferiram de acordo com a paisagem do entorno, sendo eles: Ambiente I – pareado à pastagem, Ambiente II – intermediário, Ambiente III – pareado à mata (fragmento florestal). Em cada ambiente foram coletadas 30 amostras, as quais foram transportadas ao Viveiro de Pesquisas na Universidade Federal de Viçosa, onde foram dispostas em bancada sob sombrite (50%) e avaliadas por nove meses. Foram amostrados um total de 3938 indivíduos, pertencentes a 62 espécies e 21 famílias botânicas. No Ambiente I foram contabilizados 1991 indivíduos de 47 espécies e 18 famílias, com densidade de 1061,4 propágulos por m². No Ambiente II germinaram 1031 indivíduos pertencentes a 38 espécies e 15 famílias botânicas, apresentando densidade de 549,6 propágulos/m². O ambiente III foi o único onde foi identificada a germinação de indivíduos de espécies arbóreas. Este ambiente apresentou 916 indivíduos germinados de 39 espécies e 18 famílias botânicas e densidade de 488,34 propágulos por m². Nos três ambientes observou-se predomínio de espécies nativas, pertencentes ao grupo de pioneiras, com hábitos herbáceos, e dispersão anemocórica. Em relação ao total de indivíduos nos três ambientes, observou-se proximidade de quantidade de indivíduos nativos e exóticos, e predomínio de indivíduos pioneiros, com hábitos herbáceos e dispersão anemocórica. Os resultados alcançados neste estudo destacam a importância da restauração florestal ativa por meio de plantio de mudas de espécies nativas regionais, particularmente nas áreas distantes de florestas nativas, além de acentuarem a necessidade de um bom programa de monitoramento para garantir o sucesso dos projetos de restauração.

Palavras-chaves: Bioindicadores, Germinação de sementes, Ecologia, Diversidade.

Chapter II: Soil seed bank from three environments in an area affected by the tailings of the Fundão dam in the process of forest restoration in the municipality of Barra Longa, Minas Gerais, Brasil.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the soil seed bank in three environments under restoration on the tailings from the rupture of the Fundão dam, in Barra Longa, Minas Gerais. The study was carried out in areas impacted by the tailings from the Fundão dam failure, where restoration plantations are located. For the collection of the seed bank, three environments were defined which differed according to the surrounding landscape: Environment I – close to the pasture, Environment II – intermediate, Environment III – close to the forest. In each environment, 30 samples were collected, and transported to the Research Nursery at the Federal University of Viçosa, where they were placed on a bench under shade (50%) and evaluated for nine months. A total of 3938 individuals were sampled, belonging to 62 species and 21 botanical families. In Environment I, 1991 individuals of 47 species and 18 families were counted, with a density of 1061.4 propagules per m². In Environment II germinated 1031 individuals belonging to 38 species and 15 botanical families, presenting a density of 549.6 propagules/m². Environment III was the only one where germination of individuals with arboreal characteristics was identified. This environment presented 916 germinated individuals of 39 species and 18 botanical families and a density of 488.34 propagules per m². In the three environments there was a predominance of native species, belonging to the group of pioneers, with herbaceous habits, and anemochoric dispersion. Regarding the total number of individuals in the three environments, there was also a predominance of pioneers, with herbaceous habits and anemochoric dispersion, and native and exotic individuals represented a large part of the total in relation to origin. The results achieved in this study highlight the importance of active forest restoration through the planting of native seedlings in these areas, in addition to highlighting the need for a good monitoring program to ensure the success of restoration projects.

Keywords: Bioindicators, Germination, Ecology, Diversity.

1. Introdução

A geração de impactos ambientais negativos evidencia a necessidade de realização de ações de mitigação em um ambiente alterado. Diante disso, a restauração ecológica possui como objetivo principal retornar um ambiente degradado às condições anteriores ao distúrbio, recuperando sua biodiversidade e funções ecológicas e conseqüentemente aumentando as chances de restabelecimento do ecossistema (SER, 2004; GANN et al., 2019; DA ROSA & MARQUES, 2021; MARTINS et al., 2021; ROMANELLI et al., 2022). Assim, para alcançar os objetivos da restauração, deve-se utilizar técnicas que visem potencializar o aproveitamento da resiliência do próprio ambiente (MARTINS et al., 2012).

Desde o rompimento da barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais, ocorrido em 05 de novembro de 2015, vários trabalhos vêm sendo realizados nas áreas atingidas direta e indiretamente pelo rejeito, que se encontra sob diferentes profundidades ao longo das áreas. Na parte ambiental, em relação à restauração ecológica destas áreas, estão sendo desenvolvidos estudos para testar metodologias e técnicas de restauração mais adequadas às condições das áreas, além de buscar conhecer os principais bioindicadores presentes no ambiente, como a regeneração natural, serapilheira e o banco de sementes do solo (MARTINS et al., 2019; CAMPANHARO et al., 2020). Nesse contexto, o banco de sementes do solo se apresenta como uma importante ferramenta de manejo e tomada de decisões para a restauração de tais áreas (PILOCELLI, 2020; SILVA et al., 2021).

O banco de sementes do solo é constituído pela existência de sementes e outros propágulos que se encontram sobre a camada superficial ou no interior do solo, viáveis ou dormentes, recrutadas através da chuva de sementes proveniente de espécies da própria área ou áreas adjacentes (MARTINS et al., 2015; JARA-GUERRERO et al., 2020). Consiste em um sistema dinâmico que apresenta entradas pela dispersão das espécies, e saídas que ocorrem devido à predação (aves, roedores), perda de viabilidade e morte das sementes, bem como pela germinação (CALDATO et al., 1996; MIRANDA-NETO et al., 2014). É formado principalmente por propágulos advindos de espécies pioneiras que, em ambientes sombreados, não encontram condições favoráveis à germinação e ao estabelecimento, à não ser que ocorra algum distúrbio na área (MARTINS & KUNZ, 2007; MIRANDA NETO et al., 2017).

O banco de sementes do solo é reconhecido como um excelente bioindicador da resiliência de ambientes após distúrbios, sendo a sua avaliação fundamental nesses casos (CALEGARI et al., 2013; MARTINS et al. 2015; SILVA et al., 2019; ADJALLA et al., 2022). O histórico de uso de uma área está estritamente relacionado com o banco de sementes do solo, ou seja, áreas em que a vegetação foi suprimida e foram intensivamente utilizadas para agri-

cultura ou pecuária por longos períodos, devem apresentar baixa riqueza e diversidade de sementes quando comparadas a áreas que não possuem o mesmo histórico (HOLL, 2013).

Conhecer um ambiente através da composição florística, densidade de sementes e dinâmica das espécies do banco de sementes do solo, além de indicar o estado de conservação da área, permite também inferir sobre a possibilidade de infestação por espécies consideradas invasoras (MARTINS et al., 2008; MARTINS, 2014; SANTOS et al., 2018). Um banco de sementes com alta densidade de espécies invasoras, indica que, diante de algum distúrbio, essas espécies podem colonizar a área, competindo com as espécies nativas da região e afetando a sustentabilidade do ecossistema (MARTINS & KUNZ, 2007; BALESTRIN et al. 2019).

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo principal avaliar a diversidade e composição de espécies do banco de sementes do solo em três ambientes em processo de restauração sobre o rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão, localizados em Barra Longa, Minas Gerais, Brasil. Com os resultados obtidos, espera-se verificar o grau de contribuição da paisagem do entorno no banco de sementes e no processo de restauração dos ambientes analisados.

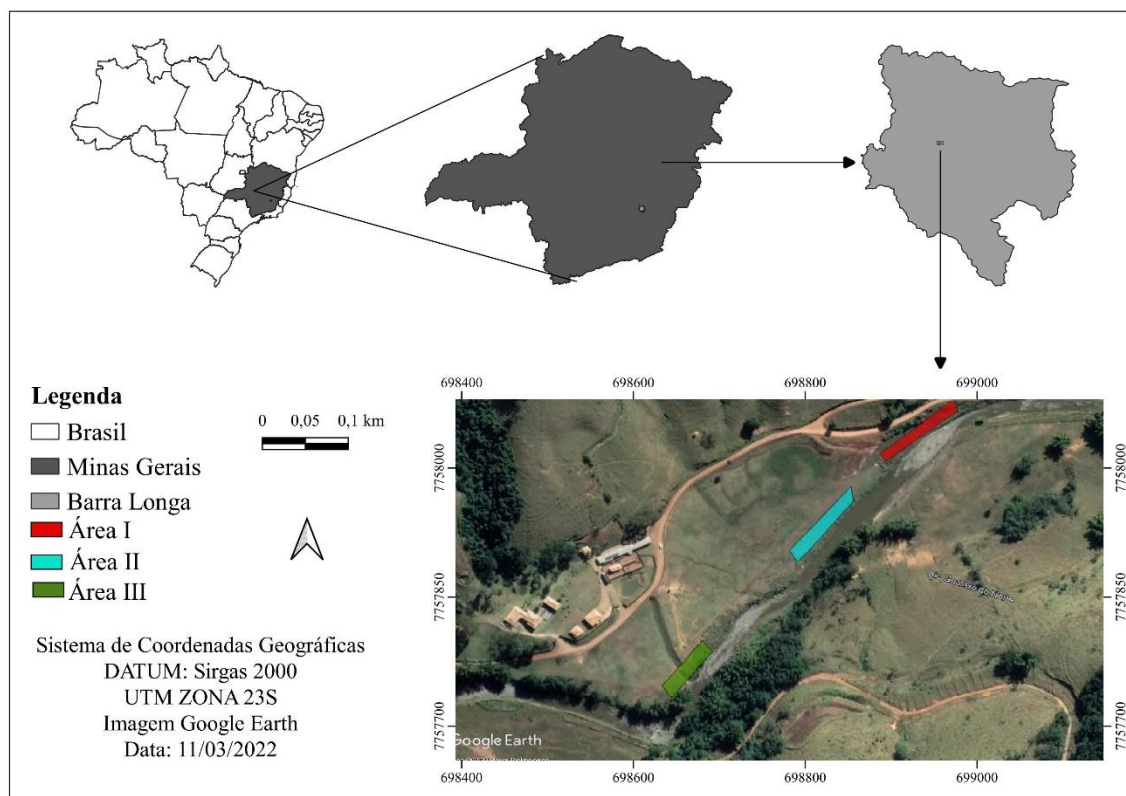
2. Material e Métodos

2.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado em uma área localizada no município de Barra Longa, Minas Gerais, atingida pelo rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão, dentro dos limites da Área Ambiental 1 de atuação da Fundação Renova (Figura 6). O município de Barra Longa está localizado entre as coordenadas 20° 16' 58" S e 43° 02' 27" O, com altitude média de 400 m, sendo o clima classificado como tropical de altitude úmido (CWA) com verões quentes e chuvosos, com pluviosidade média anual de 1400 mm. A vegetação original está inserida no bioma Mata Atlântica sendo a Floresta Estacional Semidecidual a vegetação predominante (ALVARES et al., 2014; KÖPPEN, 1948).

Todos os ambientes estudados foram impactados pelo rejeito, estando este distribuído em diferentes profundidades. Em dezembro de 2020, após cerca de 5 anos após o rompimento da barragem de Fundão, foi iniciado na área o plantio de mudas de espécies arbóreas nativas em decorrência do processo de restauração florestal. No entorno da área, a paisagem predominante é composta por pastagens manejadas, existindo também um pequeno fragmento florestal com aproximadamente 1,2 hectares.

Figura 6 - Localização da área do estudo, no município de Barra Longa, MG, com destaque para os três ambientes analisados.



2.2. Amostragem e condução do experimento

As amostras foram coletadas em áreas afetadas pelo rejeito que estão em processo de restauração através do plantio de mudas nativas regionais, caracterizando-se pela presença do Tecossolo formado a partir do rejeito. A amostragem do banco de sementes foi realizada em três ambientes delimitados de acordo com a paisagem do entorno, sendo eles:

Ambiente I: área atingida pelo rejeito onde foi realizado o plantio de mudas de espécies nativas regionais com paisagem do entorno constituída principalmente por pastagem de braquiárias (*Urochloa*), aqui denominado “pastagem”.

Ambiente II: área impactada pelo rejeito onde foi realizado o plantio de mudas nativas regionais com paisagem do entorno caracterizada como intermediária à pastagem e pequeno fragmento de floresta nativa, aqui denominado “intermediário”.

Ambiente III: área impactada pelo rejeito onde foi realizado o plantio de mudas nativas regionais com paisagem do entorno constituída pela presença de pequeno fragmento de floresta nativa, aqui denominado “mata”.

Definidas as três áreas, foram coletadas 30 amostras em cada uma delas, totalizando 90 amostras do Tecossolo superficial, utilizando-se de um gabarito (30,5 x 20,5) para retirada

do material. Em cada ambiente, as amostras foram coletadas em 2 linhas paralelas (contendo 15 amostras cada), sendo a primeira mais próxima à margem do rio, coletada nas linhas de plantio; e a segunda distante aproximadamente 7 metros desta. As 90 amostras coletadas foram acondicionadas em sacos plásticos transparentes, identificadas e transportadas para o Viveiro de Pesquisas na Universidade Federal de Viçosa.

No viveiro, as amostras foram transferidas para bandejas plásticas (dimensões: 30,5 x 20,5 x 6 cm) perfuradas para evitar o acúmulo de água e posteriormente alocadas sobre bancadas localizadas na casa de vegetação (tipo sombrite 50%) (Figura 7). Na bancada também foram colocadas bandejas preenchidas com areia grossa esterilizada, visando o controle da contaminação das amostras. A montagem do experimento sob tela tipo sombrite com 50% de sombreamento é realizada para evitar a contaminação com diásporas oriundas de áreas externas e para estimular a germinação de maior número de sementes (MARTINS et al., 2015).

Neste ambiente, as bandejas foram mantidas por aproximadamente nove meses sob irrigação por aspersão automatizada. Após oito meses da instalação do experimento, as amostras foram revolvidas para facilitar a germinação de sementes que eventualmente estivessem soterradas no fundo das bandejas.

Figura 7. Amostras do banco de sementes na casa de vegetação do Laboratório de Restauração Florestal, viveiro UFV.



2.3. Avaliação do banco de sementes

As avaliações do banco de sementes foram efetuadas em intervalos quinzenais, sendo contabilizadas e identificadas em nível de espécie todas as plântulas emergentes, independentemente de seu hábito de crescimento e forma de vida, utilizando o método de emergência de plântulas (BROWN, 1992). Os propágulos não identificados no viveiro foram coletados para consultas à literatura, ao herbário VIC da Universidade Federal de Viçosa, e a especialistas, quando necessário.

A classificação das espécies seguiu o sistema proposto pelo *Angiosperm Phylogeny Group IV* (APG IV, 2016), para confirmação dos autores dos nomes científicos utilizou-se a Lista de Espécies da Flora do Brasil (REFLORA, 2021) e as informações florísticas foram obtidas no site *The Plant List* (THE PLANT LIST, 2021). As espécies encontradas foram classificadas de acordo com a origem (nativa, exótica ou não classificada), forma de vida (arbórea, arbustiva, trepadeira, herbácea e não classificada) (REFLORA, 2021), síndrome de dispersão (zoocórica, anemocórica, hidrocórica, autocórica e não classificada) (VAN DER PIJL, 1982), e grupo sucessional (pioneira, secundária inicial, secundária tardia e não classificada), seguindo classificação de Gandolfi et al. (1995).

2.4. Análise de dados

Os parâmetros fitossociológicos de densidade, frequência e valor de importância (MUELLER-DOMBOIS & ELLENBERG, 1974), bem como os índices de diversidade de Shannon (MAGURRAN, 1988) e de equabilidade (PIELOU, 1975) foram calculados para cada área utilizando o programa FITOPAC 2.1 (SHEPHERD, 2010). Foi construído um diagrama de Veen para avaliar a similaridade de acordo com o número de espécies compartilhadas entre as áreas.

Foi utilizado o método de rarefação por meio de curvas de rarefação e extrapolação baseadas em número de indivíduos construídas com os três números de Hill, para avaliar as diferenças de riqueza, equabilidade e dominância de espécies entre ambientes amostrados (CHAO et al. 2014). Assim, a diversidade de espécies entre os ambientes foi obtida através de curvas de acumulação do número de espécies, índice de Shannon e índice de Simpson (GOTELI & COLWELL, 2001; CHAO et al. 2014). As extrapolações foram baseadas em dados de presença/ausência e número de Hill de ordem 0 com 999 replicações de *bootstrap* para estimar intervalos de confiança de 95% dos valores observados e estimados (COLWELL et al. 2012), usando o pacote “iNEXT” (HSIEH et al. 2016). Sempre que os intervalos de confiança

de 95% não se sobrepõem, se considera que os números de espécies diferiram significativamente em $P < 0,05$ (COLWELL et al. 2012).

Uma análise de escalonamento multidimensional não métrica (NMDS) foi realizada com base nas diferenças na distância Euclidiana para comparar a variação da composição de espécies entre ambientes. No NMDS foi usada a função 'metaMDS' (OKSANEN et al. 2018) e a análise de variância permutacional multivariada (PERMANOVA, 9999 *permutations*) para determinar diferenças na composição de espécies usando a rotina 'adonis' disponível no pacote "vegan" (OKSANEN et al. 2018). A avaliação da composição florística e diversidade de espécies das amostras foi realizada utilizando o software R (R Core Team 2021).

3. Resultados

Foram amostrados um total de 3938 indivíduos, pertencentes a 62 espécies e 21 famílias botânicas. A densidade de propágulos foi de 699,8 indivíduos por m². De uma maneira geral, nos ambientes avaliados houve predomínio de espécies nativas, pertencentes ao grupo das pioneiras, com hábitos herbáceos, e dispersão anemocórica. Já em relação ao total de indivíduos nos três ambientes, observou-se que os indivíduos, em sua maioria, também pertencem ao grupo de pioneiras, com hábitos herbáceos e dispersão anemocórica. Quanto à origem, os indivíduos se dividiram entre exóticos e nativos. A florística dos bancos de sementes é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Florística das espécies encontradas nos bancos de sementes dos três ambientes avaliados em Barra Longa, MG, em áreas atingidas pelo rejeito a barragem de Fundão.

Família / Espécie	Número de indivíduos		
	Ambiente I	Ambiente II	Ambiente III
Amaranthaceae			
<i>Amaranthus deflexus</i> L.	0	0	1
Asteraceae			
<i>Acanthospermum australe</i> (Loefl.) Kuntze	10	13	7
<i>Acanthospermum hispidum</i> DC.	1	5	2
<i>Bidens</i> sp.	1	2	0
<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist	5	0	5
<i>Eclipta alba</i> (L.) Hassk.	23	5	14
<i>Emilia fosbergii</i> Nicolson	5	6	3
<i>Eupatorium laevigatum</i> Lam.	0	0	1
<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.	0	0	3
<i>Gnaphalium purpureum</i> L.	16	8	0
<i>Gnaphalium spicatum</i> Lam.	8	2	2
<i>Pluchea sagittalis</i> (Lam.) Cabrera	11	0	0
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	53	44	63
<i>Vernonanthura phosphorica</i> (Vell.) H.Rob.	1	0	0

Continua...

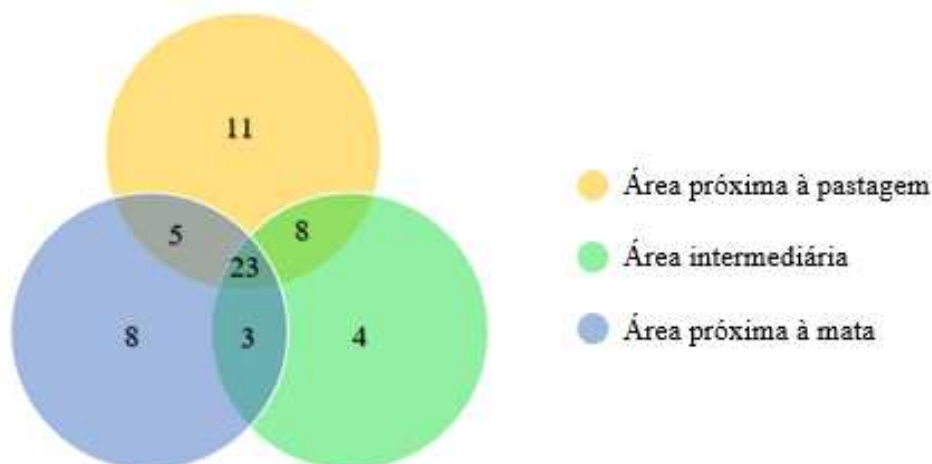
Família / Espécie	Número de indivíduos		
	Ambiente I	Ambiente II	Ambiente III
Balsaminaceae			
<i>Impatiens</i> sp.	1	7	4
Begoniaceae			
<i>Begonia cucullata</i> Willd.	7	0	2
<i>Begonia</i> sp.	4	0	0
Brassicaceae			
<i>Lepidium virginicum</i> L.	25	24	18
Convolvulaceae			
<i>Ipomoea purpurea</i> (L.) Roth	1	0	0
Cyperaceae			
<i>Cyperus difformis</i> L.	0	0	2
<i>Cyperus distans</i> L. f.	97	16	11
<i>Cyperus rotundus</i> L.	667	202	206
<i>Cyperus</i> sp.	102	6	0
<i>Eleocharis elegans</i> (Kunth) Roem. & Schult.	0	4	56
<i>Eleocharis sellowiana</i> Kunth	6	0	5
Euphorbiaceae			
<i>Croton glandulosus</i> L.	9	0	3
<i>Euphorbia hirta</i> L.	14	30	126
<i>Euphorbia hyssopifolia</i> L.	4	7	97
<i>Phyllanthus niruri</i> L.	7	0	0
<i>Phyllanthus tenellus</i> Roxb.	0	2	0
Fabaceae			
<i>Desmodium barbatum</i> (L.) Benth.	1	2	13
<i>Glycine wightii</i> (Graham ex Wight & Arn.) Verdc.	1	2	0
<i>Mimosa pigra</i> L.	7	6	2
Lamiaceae			
<i>Hyptis suaveolens</i> (L.) Poit.	45	0	0
<i>Marsipianthes chamaedrys</i> (Vahl) Kuntze	2	11	0
Lythraceae			
<i>Cuphea</i> sp.	8	0	0
Malvaceae			
Não identificada 1	1	0	0
<i>Sida rhombifolia</i> L.	0	19	1
<i>Sida urens</i> L.	0	4	0
<i>Triumfetta semitriloba</i> Jacq.	0	0	1
Melastomataceae			
<i>Clidemia hirta</i> (L.) D. Don	16	0	2
<i>Miconia latecrenata</i> DC. Naudin	1	0	0
Onagraceae			
<i>Ludwigia grandiflora</i> (Michx.) Greuter & Burdet.	2	0	0
<i>Ludwigia leptocarpa</i> (Nutt.) H.Hara	11	2	0
<i>Ludwigia tomentosa</i> (Cambess.) H. Hara	49	14	8

Continua...

Família / Espécie	Número de indivíduos		
	Ambiente I	Ambiente II	Ambiente III
Oxalidaceae			
<i>Oxalis corniculata</i> L.	9	1	0
Plantaginaceae			
<i>Scoparia dulcis</i> L.	103	164	63
<i>Stemodia verticillata</i> (Mill.) Hassl.	36	190	33
Poaceae			
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	9	2	0
<i>Digitaria sanguinalis</i> (L.) Scop.	223	52	33
<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	38	41	12
<i>Paspalum paniculatum</i> L.	2	8	7
<i>Urochloa decumbens</i> (Stapf) R.D.Webster	266	88	49
<i>Urochloa plantaginea</i> (Link) R.D.Webster	11	14	29
Portulacaceae			
<i>Portulaca oleracea</i> L.	0	11	27
Rubiaceae			
<i>Richardia brasiliensis</i> Gomes	57	0	0
Solanaceae			
<i>Solanum americanum</i> Mill.	15	15	2
<i>Solanum cernuum</i> Vell.	0	1	0
<i>Solanum mauritianum</i> Scop.	0	0	1
Urticaceae			
<i>Cecropia glaziovii</i> Snethl.	0	0	1
<i>Cecropia hololeuca</i> Miq.	0	0	1
<i>Pilea microphylla</i> (L.) Liebm.	0	1	0
Total	1991	1031	916

Quanto ao compartilhamento de espécies, 23 espécies foram comuns aos três ambientes, correspondendo a 37,1% do total de espécies amostradas. No banco de sementes da área mais próxima à pastagem, foram documentadas 11 espécies exclusivas a este ambiente, 8 espécies compartilhadas com o banco de sementes da área intermediária, e 5 espécies compartilhadas com a área próxima ao fragmento florestal. O banco de sementes da área intermediária, apresentou apenas 4 espécies exclusivas ao ambiente e 3 espécies compartilhadas com o banco de sementes da área próxima à floresta. Por sua vez, no banco de sementes da área próxima ao fragmento foram encontradas 8 espécies exclusivas ao ambiente (Figura 8).

Figura 8 - Diagrama de Venn para demonstrar as espécies compartilhadas entre os bancos de sementes dos ambientes avaliados.

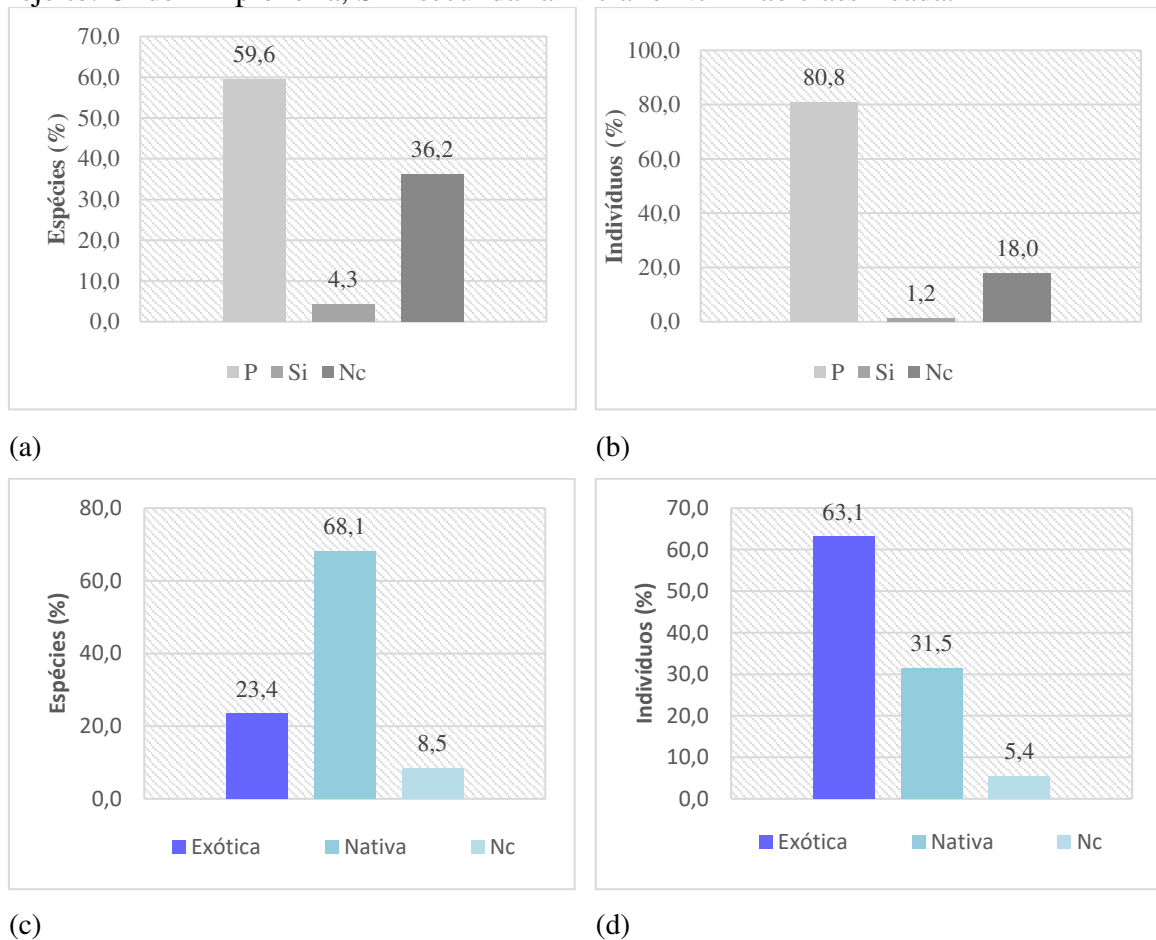


3.1. Banco de Sementes do Ambiente I

No banco de sementes do Ambiente I foram contabilizados 1991 indivíduos germinados, pertencentes a 47 espécies e 18 famílias. A densidade de propágulos na área foi de 1061,4 propágulos por m². Os índices de Shannon e de Equabilidade obtidos para esta área foram 2 de ,530 e 0,657, respectivamente. Entre as espécies, uma foi identificada apenas em nível de família e cinco foram identificadas a nível de gênero. Nove espécies foram recrutadas com apenas um indivíduo. Em relação ao valor de importância, destacaram-se as espécies: *Cyperus rotundus* L., *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster, *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop., *Scoparia dulcis* L. e *Sonchus oleraceus* L., sendo *Cyperus rotundus* responsável por 33,50% dos indivíduos. Neste ambiente as famílias botânicas que tiveram maior destaque em relação à abundância de indivíduos foram: Cyperaceae, Poaceae, Asteraceae, Plantaginaceae e Onagraceae, sendo as cinco responsáveis por 88,2% dos indivíduos contabilizados.

Na definição do grupo sucessional, 59,6% das espécies corresponderam a pioneiras e 4,3% a secundárias iniciais. As espécies não classificadas totalizaram 36,2% (Figura 9a). Considerando o total de indivíduos, 80,8% dos indivíduos contabilizados foram classificados como de espécies pioneiras, enquanto 1,2% foram categorizados como de secundárias iniciais e 18,0% não foram classificados (Figura 9b). Em relação à origem das espécies, houve um predomínio de nativas (68,1%) em relação às espécies exóticas (23,4%). As espécies que não foram classificadas quanto a origem corresponderam a 8,5% do total (Figura 9c). Para os indivíduos, aqueles que foram classificados como de espécies exóticas totalizaram 63,1%, enquanto 31,5% foram classificados como nativas e 5,4% não classificados em nenhuma das categorias (Figura 9d).

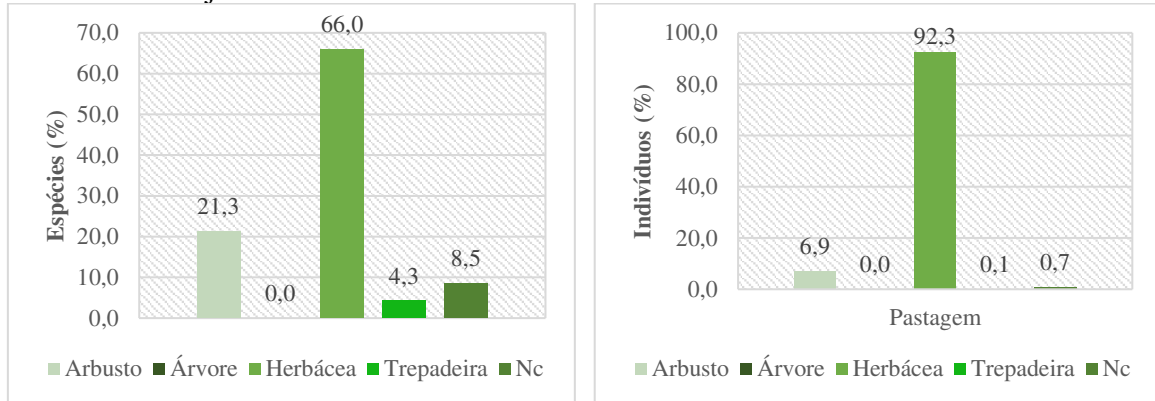
Figura 9 - Distribuição do grupo sucessional em relação ao total de espécies (a) e indivíduos (b); e distribuição da origem das espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área próxima à pastagem em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Onde P = pioneira, Si = secundária inicial e Nc = não classificada.



Quanto ao hábito de vida das espécies presentes no banco de sementes, 66,0% são herbáceas, 21,3% arbustivas, 4,3% trepadeiras e 8,5% não foram classificadas (Figura 10a). Em relação aos indivíduos, foi constatado o predomínio de herbáceas, responsáveis por 92,3%, seguidas por arbustivas (6,9%) e trepadeiras (0,1%); os indivíduos não classificados corresponderam a 0,7% (Figura 10b). A respeito da síndrome de dispersão, entre as espécies a dispersão anemocórica representou 55,3% do total, zoocoria 17,0%, autocoria 14,9%, hidrocoria apenas 2,1% e 10,6% das espécies não foram classificadas (Figura 10c). Entre os indivíduos, aqueles com dispersão anemocórica representaram 90,2% do total. Em seguida, 4,9% dos indivíduos possuem dispersão zoocórica, 3,9% autocórica, 0,6% hidrocórica e 0,4% não foram classificados quanto à síndrome de dispersão (Figura 10d).

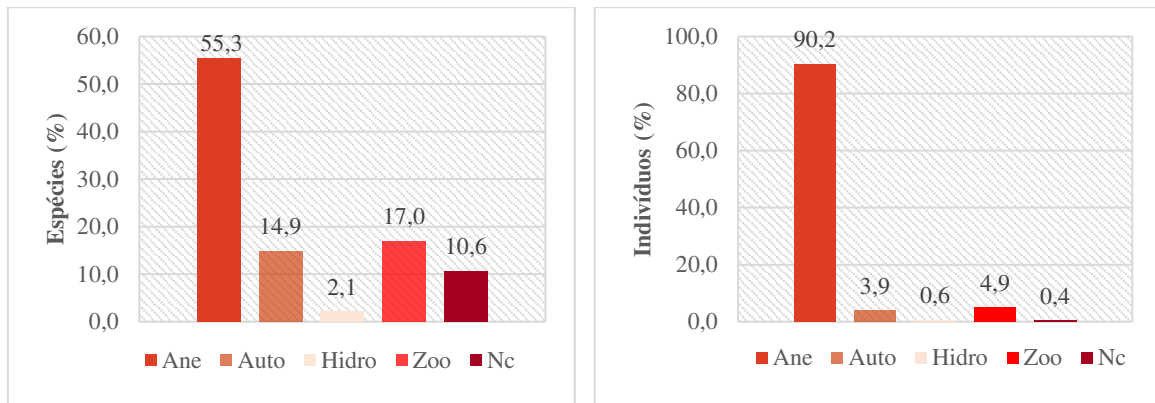
Figura 10 - Distribuição das espécies (a) e indivíduos (b) quanto ao hábito de vida; e síndrome de dispersão de sementes em relação ao total de espécies (c) e indivíduos (d), ambos

para o banco de sementes coletado na área próxima à pastagem em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Nc = não classificada.



(a)

(b)



(c)

(d)

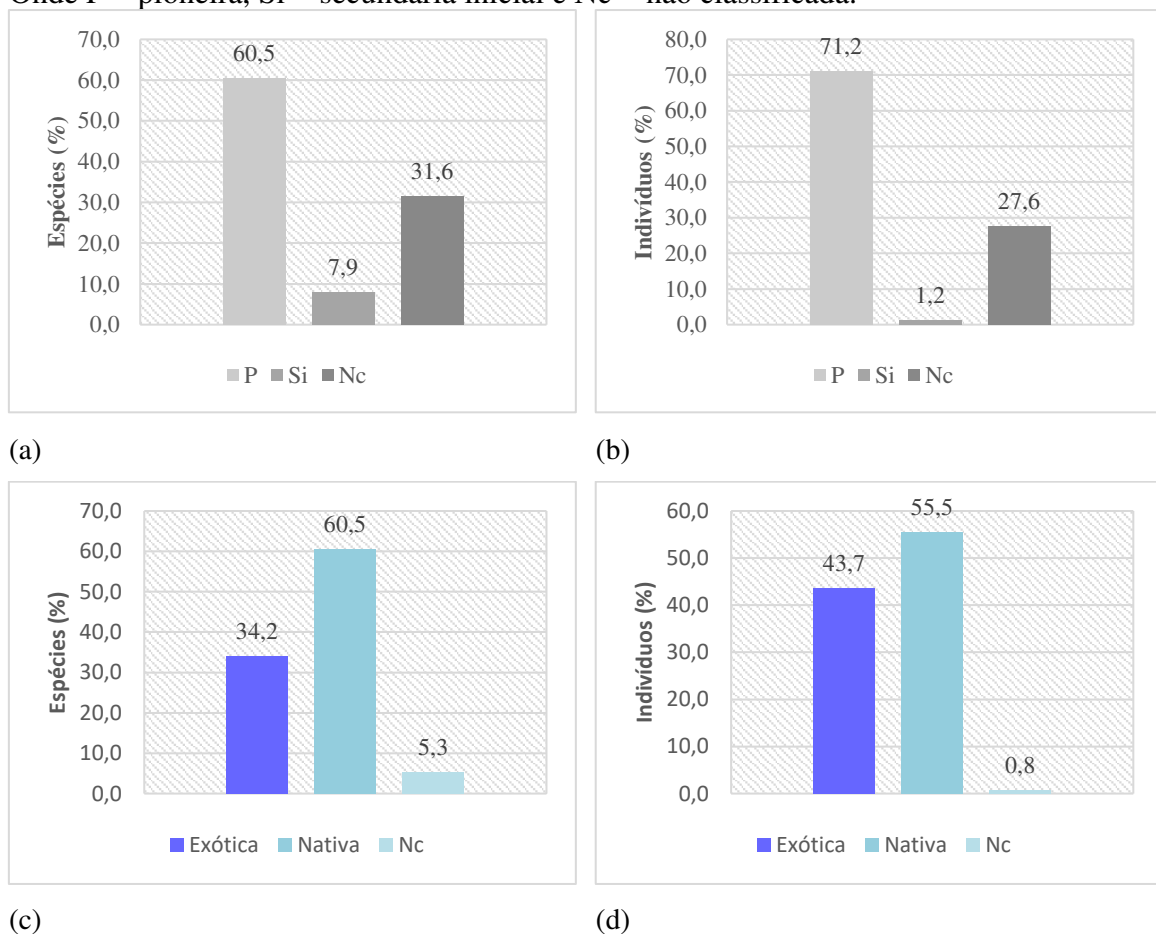
3.2. Banco de Sementes do Ambiente II

Na área intermediária à pastagem e ao fragmento florestal, foram contabilizados 1031 indivíduos germinados no banco de sementes, pertencentes a 38 espécies e 15 famílias botânicas. A densidade na área foi de 549,6 propágulos/m², o índice de Shannon 2,639 e o índice de Equabilidade foi igual a 0,725. Em relação às espécies, três foram identificadas apenas em nível de gênero e outras três tiveram apenas um indivíduo contabilizado. As espécies com maiores valores de importância foram: *Cyperus rotundus* L., *Scoparia dulcis* L., *Stemodia verticillata* (Mill.) Hassl., *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster e *Eleusine indica* (L.) Gaertn. Entre as famílias, Plantaginaceae, Cyperaceae, Poaceae, Asteraceae e Euphorbiaceae foram as mais abundantes, obtendo os maiores valores de importância.

Na definição da categoria sucessional das espécies, 60,5% foram classificadas como pioneiras, 7,9% como secundárias iniciais e 31,6% não foram classificadas quanto à categoria sucessional (Figura 11a). Em relação ao total de indivíduos, 71,2% foram categorizados como de espécies pioneiras, 1,2% de espécies secundárias iniciais e 27,6% sem classificação (Figura

11b). No que tange à origem das espécies, as classificadas como nativas representaram 60,5% do total, enquanto 34,2% das espécies foram classificadas como exóticas e 5,3% não foram classificadas (Figura 11c). Considerando o total de indivíduos, 55,5% foram categorizados como de espécies nativas, 43,7% como exóticas e 0,8% não tiveram classificação quanto à origem (Figura 11d).

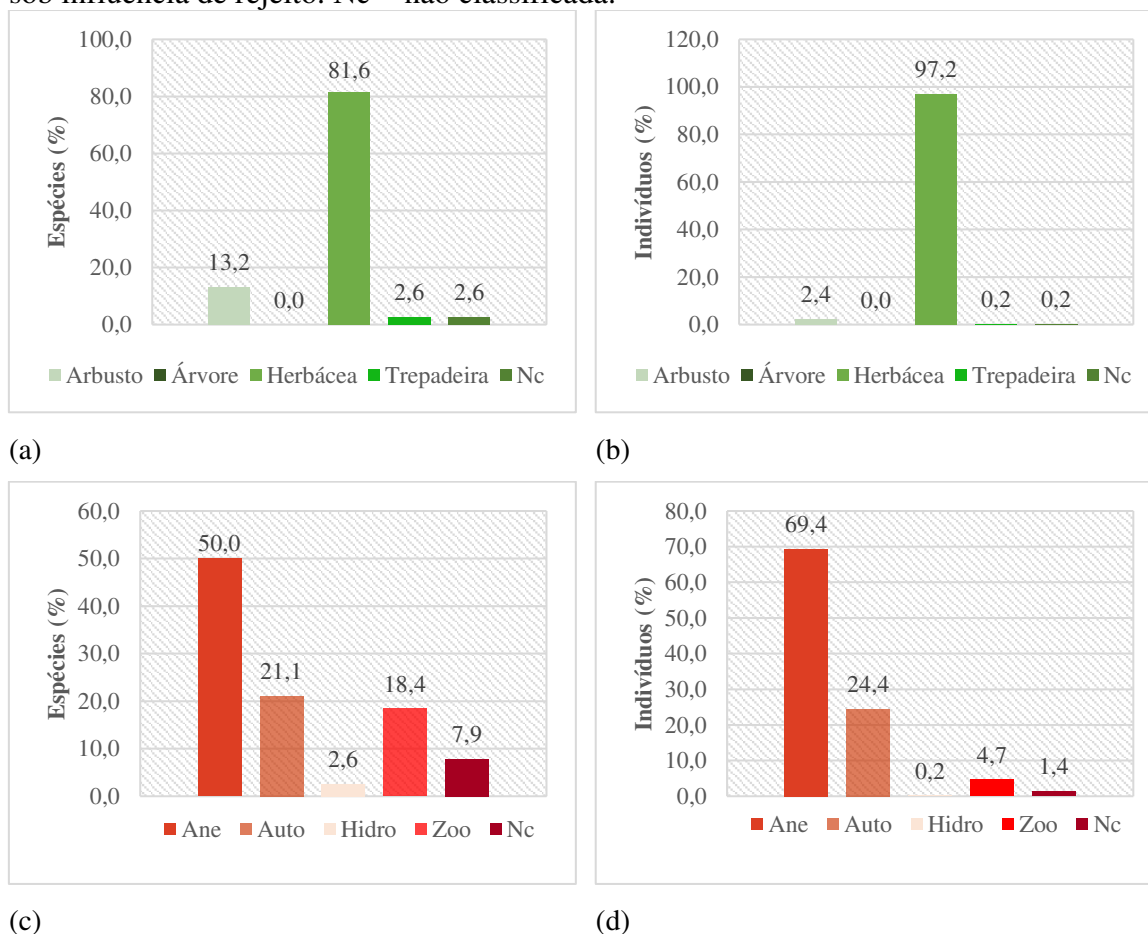
Figura 11 - Distribuição das espécies (a) e indivíduos (b) em relação ao grupo sucessional; e distribuição da origem das espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área entre a mata e a pastagem em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Onde P = pioneira, Si = secundária inicial e Nc = não classificada.



Quanto ao hábito de vida das espécies, 81,6% possuem características herbáceas, enquanto 13,2% características arbustivas. Espécies não classificadas e trepadeiras corresponderam a 2,6% do total de espécies, cada (Figura 12a). Em relação aos indivíduos, houve forte predomínio de indivíduos com características herbáceas (97,2%). Os demais indivíduos corresponderam aos grupos de arbustos (2,4%), trepadeiras (0,2%) e não classificados (0,2%) (Figura 12b). Na classificação da síndrome de dispersão, as espécies anemocóricas representaram 50,0% do total, autocóricas 21,1%, zoocóricas 18,4%, hidrocóricas 2,6% e 7,9% não fo-

ram categorizadas (Figura 12c). Para o total de indivíduos, também houve predomínio da anemocoria, que representou 69,4%. Na sequência, 24,4% foram classificados como autocóricos, 4,7% zoocóricos, 0,2% hidrocóricos e 1,4% não classificados (Figura 12d).

Figura 12 - Distribuição quanto ao hábito de vida das espécies (a) e dos indivíduos (b); e síndrome de dispersão de sementes em relação ao total de espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área entre a mata e a pastagem em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Nc = não classificada.



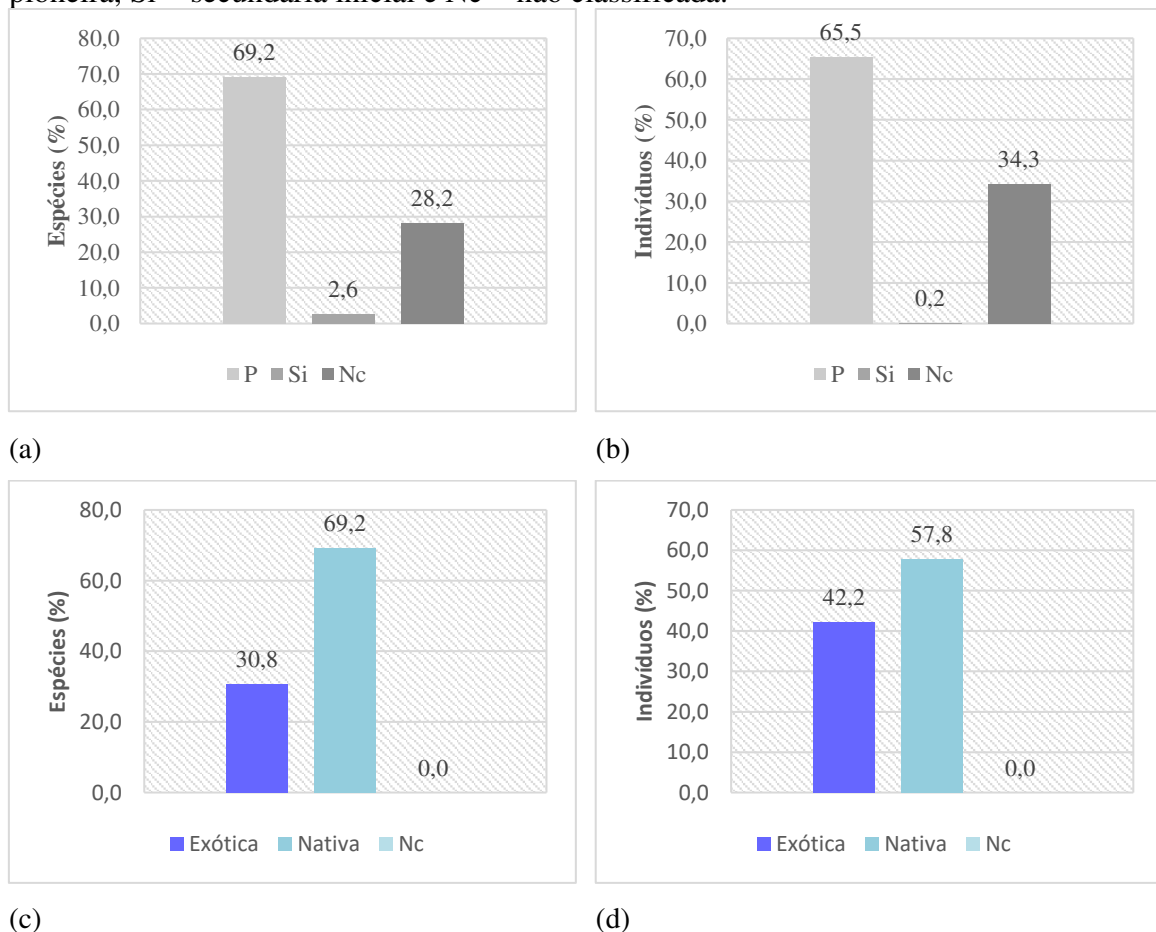
3.3. Banco de Sementes do Ambiente III

No banco de sementes do Ambiente III, foram contabilizados 916 indivíduos germinados, pertencentes a 39 espécies e 18 famílias botânicas. A densidade na área foi de 488,34 propágulos por m². Os índices de Shannon e de Equabilidade para esta área foram de 2,704 e 0,738, respectivamente. Dentre as espécies, sete tiveram apenas um indivíduo contabilizado e uma foi identificada somente a nível de gênero. As espécies com maiores valores de importância foram: *Cyperus rotundus* L., *Chamaesyce hirta* (L.) Millsp., *Chamaesyce hyssopifolia* (L.) Small, *Scoparia dulcis* L. e *Sonchus oleraceus* L.. Essas cinco espécies representam 60,6% do total de indivíduos neste ambiente. As famílias mais abundantes foram Cyperaceae,

Euphorbiaceae, Poaceae, Plantaginaceae e Asteraceae, responsáveis por englobar 90,8% dos indivíduos e 61,5% do total de espécies.

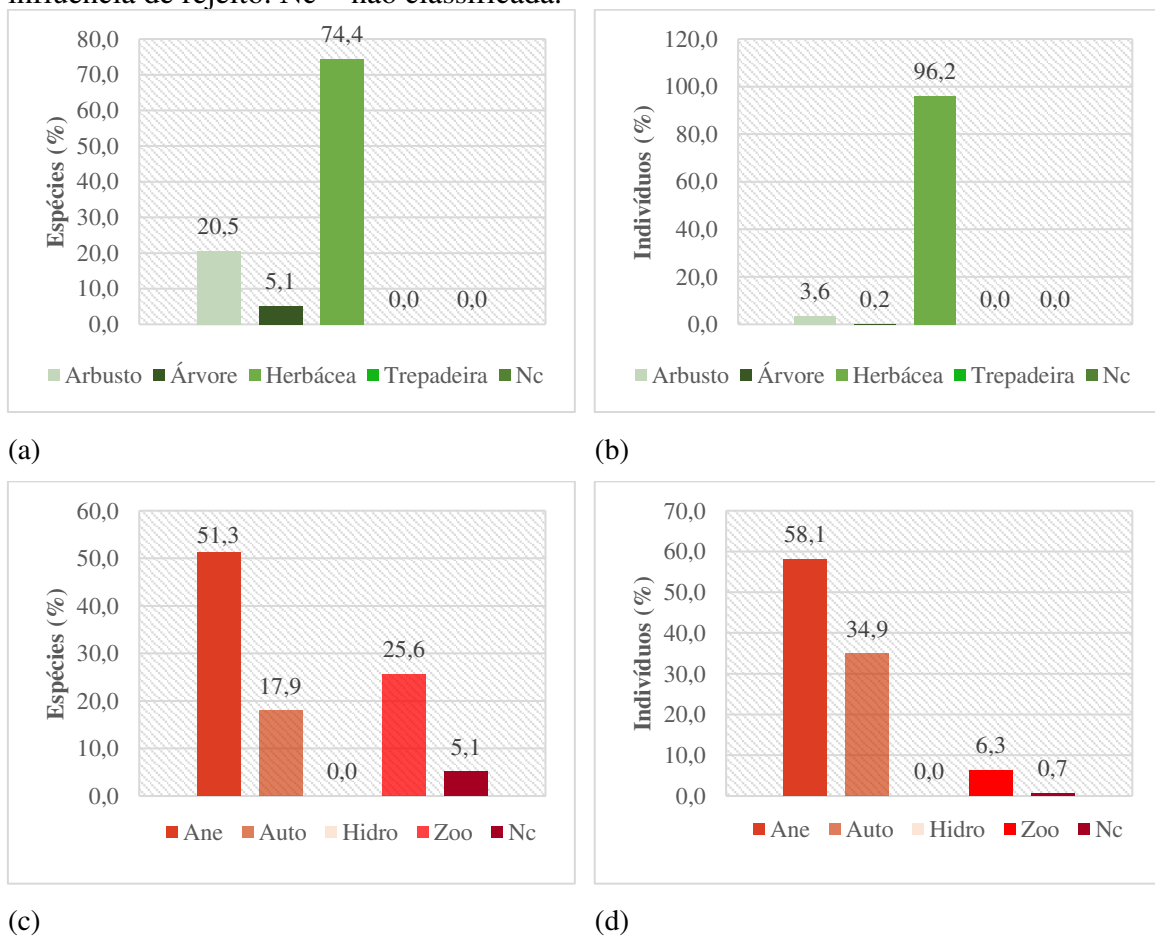
Em relação à categoria sucessional das espécies identificadas nesse ambiente, 69,2% foram classificadas como pioneiras, 2,6% como secundárias iniciais, e para 28,2% das espécies não foi possível obter dados para classificação quanto à categoria sucessional (Figura 13a). Considerando a categoria sucessional dos indivíduos, pioneiras corresponderam a 65,5% e as secundárias iniciais a apenas 0,2%. O total de indivíduos que não foram classificados quanto à categoria sucessional foi de 34,3% (Figura 13b). Quanto à origem, espécies que foram classificadas como nativas representaram 69,2% do total enquanto 30,8% das espécies foram classificadas como exóticas (Figura 13c). Em relação aos indivíduos, 57,8% foram categorizados como de espécies nativas, 42,2% foram categorizados como de espécies exóticas (Figura 13d).

Figura 13 - Distribuição das espécies (a) e indivíduos (b) em relação ao grupo sucessional; e distribuição da origem das espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área próxima à mata em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Onde P = pioneira, Si = secundária inicial e Nc = não classificada.



No que se refere ao hábito de vida, as espécies com características herbáceas se destacaram, correspondendo a 74,4%. As espécies arbustivas corresponderam a 20,5%, enquanto as espécies arbóreas representaram 5,1% do total (Figura 14a). Em relação ao total de indivíduos, o predomínio de herbáceas foi ainda maior, sendo de 96,2%. Os indivíduos com características arbustivas corresponderam a 3,6% e os indivíduos arbóreos apenas 0,2% (Figura 14b). Quanto à síndrome de dispersão das sementes, a dispersão anemocórica destacou-se ao representar 51,3% das espécies. Em seguida, 25,6% das espécies foram classificadas com dispersão zoocórica, 17,9% como autocóricas, e 5,1% das espécies não categorizadas (Figura 14c). Considerando os indivíduos contabilizados na área, a anemocoria seguiu com maior valor, sendo 58,1%. Em seguida, 34,9% foram classificados com dispersão autocórica e 6,3% com dispersão zoocórica. Indivíduos não classificados corresponderam a 0,7% (Figura 14d).

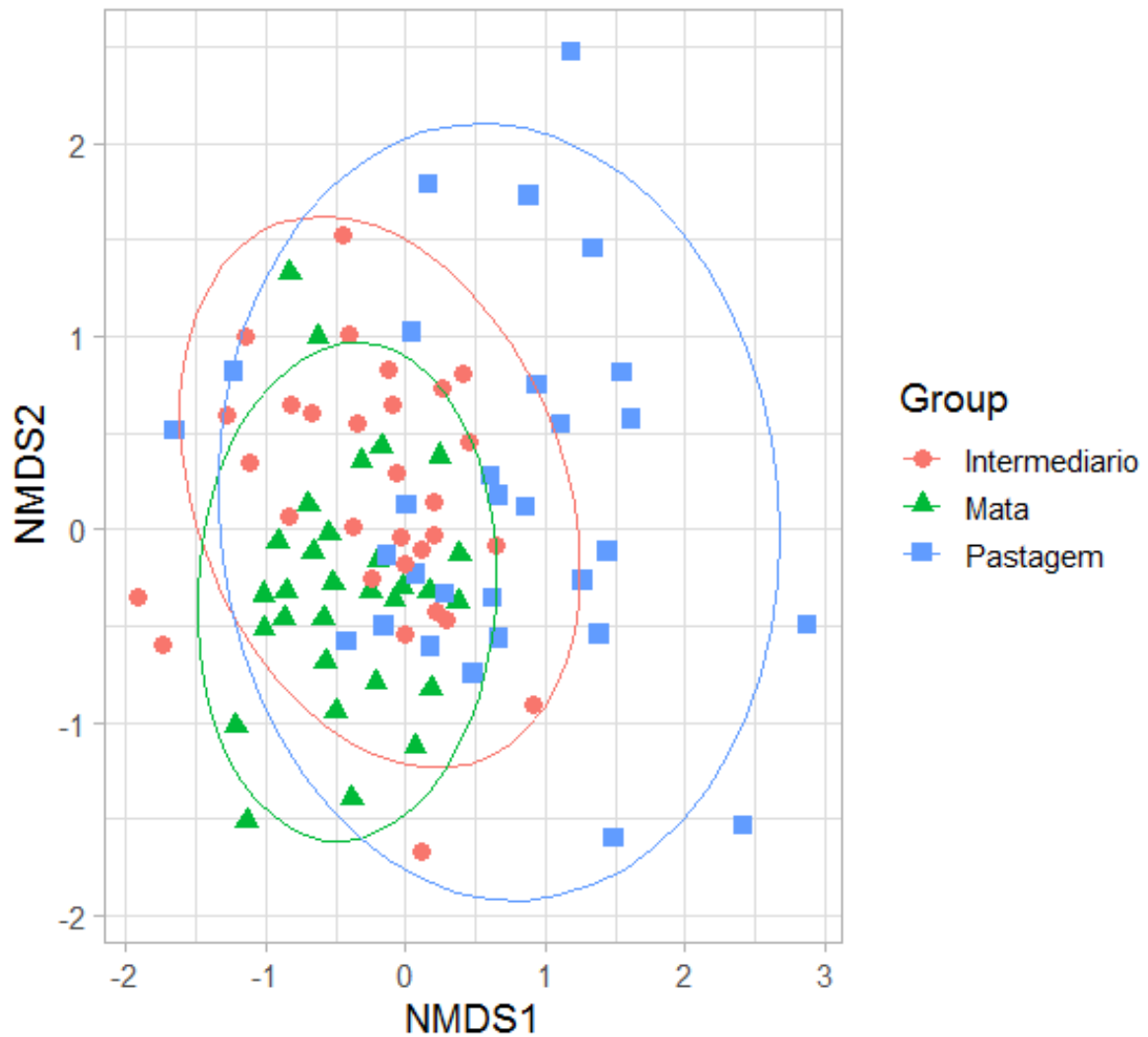
Figura 7 - Distribuição quanto ao hábito de vida das espécies (a) e dos indivíduos (b); e síndrome de dispersão de sementes em relação ao total de espécies (c) e indivíduos (d), ambos para o banco de sementes coletado na área próxima à mata em Barra Longa, MG, sob influência de rejeito. Nc = não classificada.



3.4. Composição, riqueza e diversidade de espécies

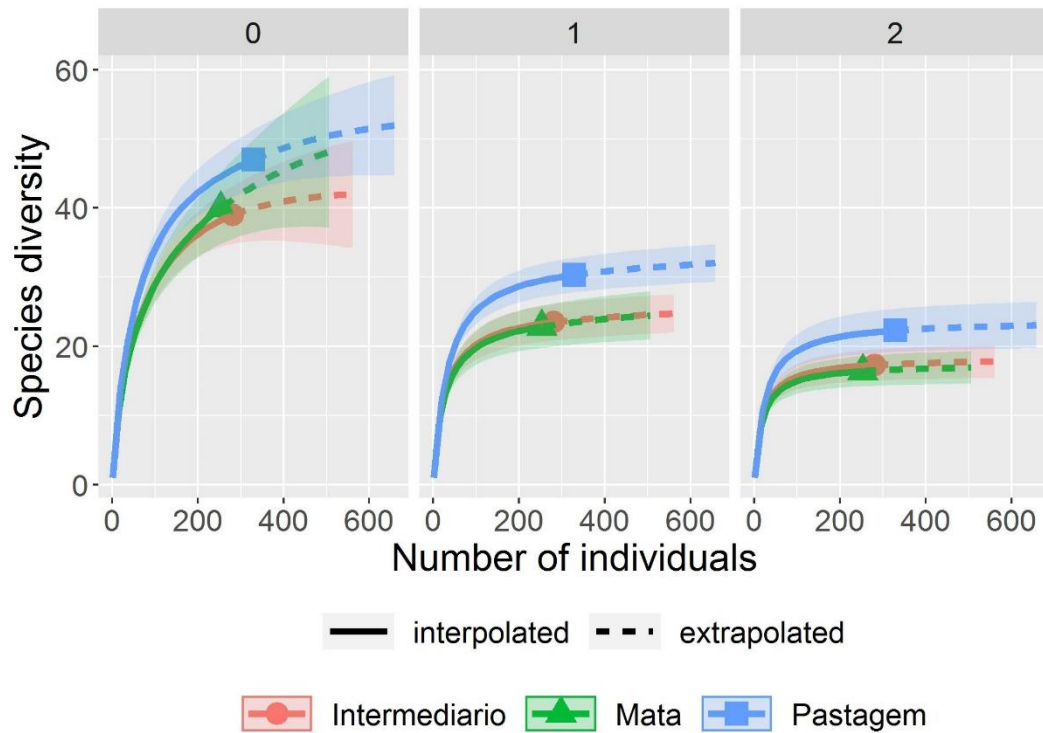
Houve diferença significativa na composição florística dos bancos de sementes entre os ambientes (PERMANOVA: $F_{2,89} = 3,03$; $p < 0,001$, Stress Euclidean = 0,22). O banco de sementes do ambiente próximo à pastagem apresentou distribuição mais ampla ao longo dos dois eixos e se diferenciou dos demais, enquanto esses não diferiram entre si para a composição florística (Figura 15).

Figura 8 - Composição florística de espécies para os três ambientes mediante NMDS para os três ambientes.



Além disso, o ambiente próximo à pastagem diferiu estatisticamente dos demais quanto à riqueza, índice de Shannon e índice de Simpson, com maiores valores em ambos. Os demais ambientes não diferiram entre si quanto a diversidade de espécies (Figura 16).

Figura 16 - Índices de rarefação para diversidade das amostras dos três ambientes, em que 0 = riqueza, 1 = Índice de Shannon-Wiener e 2 = Índice de Simpson.



4. Discussão

4.1. Composição, riqueza e diversidade de espécies

Considerando os três ambientes analisados, os bancos de sementes do solo das áreas sob influência de rejeito em Barra Longa, Minas Gerais, apresentaram riqueza (62 espécies) superior a estudos realizados em áreas em processo de restauração (BALESTRIN et al., 2019; SILVA et al., 2019) e fragmento conservado (SOARES & LAURITO, 2018), e inferior a Franco et al. (2012), Calegari et al. (2013) e Miranda Neto et al. (2014), todos estudos realizados em trechos de Floresta Estacional Semidecidual. Em comparação a áreas sob influência de rejeito de mineração, a riqueza de espécies do presente estudo foi igual à obtida em área com condução da regeneração natural e um pouco inferior ao da área com plantio de mudas nativas (66), ambas em Mariana, Minas Gerais (PILOCELLI, 2020).

Além disso, a densidade de propágulos deste estudo foi superior a encontrada por Oliveira et al. (2018) e inferior a áreas em processo de restauração (SILVA et al., 2019; BARGOENA et al., 2020), ambos estudos realizados na Mata Atlântica brasileira. Nos bancos de sementes estudados houve predomínio de indivíduos com características herbáceas, assim como em estudos desenvolvidos em outras áreas perturbadas (MARTINS et al., 2008; RO-

DRIGUES et al., 2010; FRANCO et al., 2012; RIBEIRO et al, 2017; SOUZA et al; 2018, COSTA et al., 2020, PILOCELLI, 2020).

Áreas que sofreram grandes distúrbios normalmente apresentam maior densidade de espécies herbáceas, uma vez que essas espécies geralmente possuem dispersão anemocórica e produzem grande quantidade de sementes, formando assim um banco de sementes persistente (RODRIGUES et al., 2010; MARTINS, 2012). Neste estudo, o predomínio de espécies herbáceas está relacionado com o período reduzido de tempo pós distúrbio. Essas espécies atuam no processo inicial de colonização das áreas, se adaptando melhor às condições iniciais, contribuindo para melhorar as condições do solo em nível local com diminuição da irradiação, controle de erosão, melhoria do microclima, entre outros, justificando a abundância destas neste estudo (MARTINS et al., 2008; CALEGARI et al., 2013). Por outro lado, as espécies herbáceas exóticas e agressivas como as gramíneas podem impedir ou retardar o crescimento de espécies arbóreas e arbustivas, dificultando a regeneração natural na área por meio do banco de sementes do solo (FRANCO et al., 2012).

A maioria dos indivíduos e espécies identificadas nos bancos de sementes possuem a anemocoria como síndrome de dispersão de sementes, evidenciando a importância desta síndrome para o início do processo sucessional, uma vez que as sementes podem ser transportadas por grandes distâncias por intermédio do vento (COSTA et al., 2018; BALESTRIN et al., 2019). Cabe destacar que o predomínio da anemocoria foi bastante influenciado pela alta ocorrência de espécies herbáceas identificadas, que em sua maioria dispersam sementes por meio desta síndrome.

Foi verificado o predomínio de espécies e indivíduos pertencentes ao grupo ecológico de pioneiras em todos os bancos de sementes avaliados. Esse resultado corrobora com outros estudos em Florestas Estacionais Semidecíduais (FRANCO et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2018; BALESTRIN et al., 2019; PILOCELLI, 2020; SILVA et al., 2021) onde as pioneiras também predominaram. Uma maior proporção de indivíduos pertencentes ao grupo ecológico das pioneiras é sempre esperada em áreas em processo inicial de sucessão, uma vez que as sementes de plantas pertencentes a esse grupo formam o banco de sementes persistente no solo, no qual permanecem viáveis por um longo período à espera de condições ambientais favoráveis à germinação (MIRANDA NETO et al., 2014; MARTINS, 2015).

No que diz respeito à origem das espécies, as nativas representaram a maior parte das sementes germinadas, enquanto para o total de indivíduos, aqueles classificados como de espécies nativas e exóticas tiveram participação parecida, representando grande parte do total. Na classificação utilizada, os indivíduos ou espécies consideradas nativas são aqueles que

ocorrem naturalmente na região de estudo, se dispersando sem intervenção humana, enquanto as espécies introduzidas no ambiente com intervenção humana foram classificadas como exóticas (MORO et al., 2012). O alto percentual de indivíduos de espécies exóticas indica a necessidade de maior atenção à área, pois, algumas espécies identificadas com alto número de indivíduos, como *U. decumbens*, possuem potencial invasor (CORREIA & MARTINS, 2015).

De acordo com a proposta de Mueller-Dombois e Ellenberg (1974), os bancos de sementes das três áreas são similares. A alta proporção de espécies compartilhadas (37,1 %) provavelmente se dá pela proximidade geográfica dos ambientes onde os bancos de sementes foram coletados e pelo histórico das áreas. Considerando o índice de Shannon, todos os bancos de sementes deste estudo apresentaram valores médios de diversidade, similares a outros estudos em Florestas Estacionais Semidecíduais (BALESTRIN et al., 2019; MARTINS et al., 2021). Em relação à equabilidade, o ambiente próximo à pastagem apresentou menor valor, indicando maior uniformidade dos dados, ocasionada pelo domínio de indivíduos pertencentes a poucas espécies.

4.2. Banco de Sementes do Ambiente I

O banco de sementes do ambiente próximo à pastagem apresentou maior número de espécies e indivíduos germinados, além de diferir estatisticamente dos demais ambientes quanto à composição de espécies, riqueza e diversidade. A densidade de propágulos no banco de sementes do ambiente próximo à pastagem foi superior aos valores encontrados em bancos de sementes em ambientes de mineração (MARTINS et al., 2008; MIRANDA NETO et al., 2017), inferior ao de uma floresta restaurada há 5 anos (SILVA et al., 2019) e similar ao ambiente com plantio de mudas nativas sobre o rejeito em Mariana, MG (PILOCELLI, 2020).

Os valores de densidade neste banco de sementes foram influenciados pela alta presença de indivíduos das espécies *C. rotundus*, *U. decumbens* e *D. sanguinalis*, onde a abundância dessas espécies pode se tornar um problema para a restauração dessa área (CORREIA & MARTINS, 2015; BALESTRIN et al., 2019; COSTA et al., 2020). Neste ambiente, por exemplo, não houve germinação de indivíduos arbóreos no banco de sementes do solo.

4.3. Banco de Sementes do Ambiente II

No banco de sementes do ambiente intermediário – entre a mata e a pastagem, a densidade de sementes germinadas foi inferior ao ambiente próximo à pastagem e superior ao ambiente próximo à mata. Em comparação a outros estudos realizados em floresta estacional

semidecidual, a densidade encontrada foi similar a Braga et al. (2008) e inferior aos valores obtidos por Miranda Neto et al. (2017) e Bargoena et al. (2020).

Em relação à riqueza de espécies, este ambiente apresentou a menor diversidade neste estudo, similar a outros trabalhos descritos (BRAGA et al., 2008; BARGOENA et al., 2020; SILVA et al., 2021). Foi observada também a predominância de indivíduos com características herbáceas, não tendo sido observada a germinação de indivíduos arbóreos.

4.4. Banco de Sementes do Ambiente III

O banco de sementes do ambiente próximo à mata (fragmento florestal) apresentou a menor densidade de propágulos (488,34 indivíduos/m²) entre os ambientes avaliados, sendo também inferior ao encontrado em ambientes de mineração (MIRANDA et al. 2014; MIRANDA et al., 2017), área de regeneração natural (KUNZ & MARTINS, 2016) e fragmento florestal preservado (PILOCELLI, 2020). Neste banco, também houve dominância de espécies herbáceas, com destaque para as espécies *C. rotundus*, *Euphorbia hirta* L. e *Euphorbia hyssopifolia* L..

Contudo, este foi o único ambiente em que foi constatada a germinação de espécies arbóreas, sendo elas *Cecropia hololeuca* Miq. e *Cecropia glaziovii* Snethl.. As espécies arbóreas encontradas pertencem ao mesmo gênero e se configuram como espécies pioneiras características de áreas em processo inicial de sucessão, podendo suas sementes ficar dormentes no solo (MIRANDA NETO et al., 2010; FRANCO et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2018).

No entanto, a germinação de apenas dois indivíduos arbóreos no banco de sementes do solo neste ambiente salienta a necessidade de intervenções para acelerar o processo de sucessão (BARGOENA et al., 2020). Em estudos também realizados em áreas sob influência do rejeito, porém mais próximas da barragem de Fundão em Mariana, os bancos de sementes apresentaram maior potencial mediante germinação de mais indivíduos e espécies com características arbóreas (PILOCELLI, 2020; SILVA et al., 2021), uma vez que a paisagem naquelas áreas apresentava matriz ainda florestal.

Esse fato evidencia que a presença de poucos indivíduos arbóreos no presente estudo também pode ser explicada pela alta fragmentação da paisagem com predominância de matriz de pastagem de braquiária no entorno (OLIVEIRA et al., 2018), e pelo fragmento florestal mais próximo ser muito pequeno e separado da área em restauração pelo rio.

5. Conclusões

Nota-se que, embora ainda de maneira sutil, os ambientes começam a apresentar diferenças de acordo com a paisagem do entorno. A similaridade entre o banco de sementes próximo ao fragmento florestal e o do ambiente intermediário indica que possa estar iniciando um fluxo de sementes nestes ambientes. Entretanto, a baixa ocorrência de indivíduos arbóreos confirma a necessidade de restauração florestal da área por meio do plantio de mudas nativas da região buscando estabelecer uma boa cobertura arbórea, como inclusive já vem sendo realizado.

Além disso, o alto índice de espécies herbáceas, notavelmente de gramíneas exóticas agressivas, encontradas nos bancos de sementes salienta a importância de um bom programa de monitoramento da restauração, uma vez que essas espécies podem se tornar limitantes ao desenvolvimento das mudas de espécies arbóreas plantadas e de regenerantes.

6. Referências Bibliográficas

- ADJALLA, Christian; TOSSO, Félicien; SALAKO, Kolawolé Valère; & ASSOGBADJO, Achille Ephrem. 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**, v. 503, p. 119744, 2022.
- ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, Jose Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; & SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- APG, I. V. The linnean society of London. **Botanical journal of the linnean society**, v. 181, p. 1-20, 2016.
- BALESTRIN, Diego; MARTINS, Sebastião Venâncio; FONSECA, Wesley da Silva, & COSIMO, Luiz Henrique Elias. Relationship between soil seed bank and canopy coverage in a mined area. **Revista Árvore**, v. 43, n. 4, 2019.
- BARGOENA, Larissa Rafaela; CAVALHEIRO, Alba Lúcia; BIANCHINI, Edmilson. Banco de sementes em reflorestamento, borda e interior de remanescente de floresta estacional semidecidual no sul do Brasil. **Iheringia, Série Botânica.**, v. 75, 2020.
- BRAGA, Antônio Jorge Tourinho; GRIFFITH, James Jackson; PAIVA, Haroldo Nogueira de, & MEIRA NETO, João Augusto Alves. Composição do banco de sementes de uma floresta semidecidual secundária considerando o seu potencial de uso para recuperação ambiental. **Revista Árvore**, v. 32, p. 1089-1098, 2008.
- BROWN, Doug. Estimating the composition of a forest seed bank: a comparison of the seed extraction and seedling emergence methods. **Canadian Journal of Botany**, v. 70, n. 8, p. 1603-1612, 1992.
- CALDATO, Silvana Lucia; FLOSS, Paulo Alfonso; DA CROCE, Dorli Mário; & LONGHI, Solon Jonas. Estudo da regeneração natural, banco de sementes e chuva de sementes na Reserva Genética Florestal de Caçador, SC. **Ciência Florestal**, v. 6, n. 1, p. 27-38, 1996.
- CALEGARI, Leandro; MARTINS, Sebastião Venâncio; CAMPOS, Lilian Cristina; SILVA, Elias; & GLERIANI, José Marinaldo. Avaliação do banco de sementes do solo para fins de restauração florestal em Carandaí, MG. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 871-880, 2013.
- CAMPANHARO, Ítalo Favoreto; MARTINS, Sebastião Venâncio; VILLA, Pedro Manuel; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; & NABETA, Fábio Haruki. Forest restoration methods, seasonality, and penetration resistance does not influence aboveground biomass stock on mining tailings in Mariana, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, 2021.
- CHAO, Anne, GOTELLI, Nicholas J., HSIEH, T.C., SANDER, Elizabeth L., MA, K.H., COLWELL, Robert K., & ELLISON, Aaron M. Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. **Ecological monographs**, v. 84, n. 1, p. 45-67, 2014.
- COLWELL, Robert K., CHAO, Anne, GOTELLI, Nicholas J., LIN, Shang Yi, MAO, Chang Xuan, CHAZDON, Robin L., LONGINO, John T., Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. **Journal of plant ecology**, v. 5, n. 1, p. 3-21, 2012.
- CORREIA, Geanna Gonçalves de Souza; MARTINS, Sebastião Venâncio. Banco de sementes do solo de floresta restaurada, Reserva Natural Vale, ES. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 79-87, 2015.

- COSTA, Poliana Ferreira da; PEREIRA, Zefa Valdivina; FERNANDES, Shaline Séfara Lopes; FRÓES, Caroline Quinhones; SANTOS, Bruna Souza dos; & BARBOSA, Thiago Oliveira. Banco de sementes do solo em áreas restauradas no sul do estado de Mato Grosso do Sul-MS. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 104-116, 2020.
- DA ROSA, Carolina M.; MARQUES, Marcia CM. How are biodiversity and carbon stock recovered during tropical forest restoration? Supporting the ecological paradigms and political context involved. **Journal for Nature Conservation**, p. 126115, 2021.
- FRANCO, Brena Karina Siqueira, MARTINS, Sebastião Venâncio; FARIA, Patrícia Carneiro Lobo; & RIBEIRO, Guido Assunção. Densidade e composição florística do banco de sementes de um trecho de floresta estacional semidecidual no campus da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 423-432, 2012.
- GANDOLFI, Sergius; LEITÃO FILHO, Hermógenes de Freitas; BEZERRA, Carlos Lineu Frota. Levantamento florístico e caráter sucessional das espécies arbustivo-arbóreas de uma floresta mesófila semidecídua no município de Guarulhos, SP. **Revista brasileira de biologia**, v. 55, n. 4, p. 753-767, 1995.
- GANN, George D.; MCDONALD, Tein; WALDER, Bethanie; ARONSON, James; NELSON, Cara R.; JONSON, Justin; ... & DIXON, Kingsley W. International principles and standards for the practice of ecological restoration. **Restoration Ecology**. **27 (S1): S1-S46.**, v. 27, n. S1, p. S1-S46, 2019.
- GOTELLI, Nicholas J.; COLWELL, Robert K. Quantifying biodiversity: procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. **Ecology letters**, v. 4, n. 4, p. 379-391, 2001.
- HSIEH, T.C., MA, K.H., & CHAO, Anne. iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). **Methods in Ecology and Evolution**, v. 7, n. 12, p. 1451-1456, 2016.
- JARA-GUERRERO, Andrea; ESPINOSA, Carlos I.; MÉNDEZ, Marcos; DE LA CRUZ, Marcelino; & ESCUDERO, Adrian. Dispersal syndrome influences the match between seed rain and soil seed bank of woody species in a Neotropical dry forest. **Journal of Vegetation Science**, v. 31, n. 6, p. 995-1005, 2020.
- KÖPPEN, Wladimir. Climatologia. México. **Fundo de Cultura Econômica**. 1948.
- KUNZ, Sustanis Horn; MARTINS, Sebastião Venâncio. Soil seed bank in seasonal semideciduous forest and abandoned pasture. **Revista Árvore**, v. 40, p. 991-1001, 2016.
- HOLL, Karen D. Restoring tropical forest. **Nature Education Knowledge**, v. 4, n. 4, p. 4, 2013.
- MAGURRAN, Anne E. **Ecological diversity and its measurement**. Princeton university press, 1988.
- MARTINS Sebastião Venâncio, KUNZ Sustanis Horn. Use of evaluation and monitoring indicators in a riparian forest restoration project in Viçosa, Southeastern Brazil. In: Rodrigues, R.R.; Martins, S.V.; Gandolfi, S. (Ed.) **High diversity forest restoration in degraded areas: methods and projects in Brazil**. New York: Nova Science Publishers, p.261-273, 2007.
- MARTINS, Sebastião Venâncio; ALMEIDA, Diego Pierre de; FERNANDES, Loane Vaz; & RIBEIRO, Tiago Maciel. Banco de sementes como indicador de restauração de uma área degradada por mineração de caulim em Brás Pires, MG. **Revista Árvore**, v. 32, n. 6, p. 1081-1088, 2008.
- MARTINS, Sebastião Venâncio; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; GANDOLFI, Sérgio; & CALEGARI, Leandro. Sucessão ecológica: fundamentos e aplicações na restauração de ecossistemas florestais. In: MARTINS, S. V. (Ed.) **Ecologia de florestas tropicais do Brasil**, v. 2, p. 21-52, 2012.

- MARTINS, Sebastião Venâncio. Recuperação de matas ciliares: no contexto do Novo Código Florestal. **Viçosa: Aprenda fácil editora**, 2014.
- MARTINS, Sebastião Venâncio; BORGES, Eduardo Euclides de Lima; SILVA, Kelly de Almeida. O banco de sementes do solo e sua utilização como bioindicador de restauração ecológica. In: Sebastião Venâncio Martins. (Org). **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**, v. 2, p. 293-330, 2015.
- MARTINS, Sebastião Venâncio; VILLA, Pedro Manuel; NABETA, Fábio Haruki; SILVA, Leonardo Ferreira; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; & DIAS, Andreia Aparecida. Study on site preparation and restoration techniques for forest restoration in mining tailings of Mariana, Brazil. **Research in Ecology**, v. 2, n. 4, 2021.
- MARTINS, Sebastião Venâncio; FONSECA, Wesley da Silva, COSIMO, Luiz Henrique Elias; & BALESTRIN, Diego. Soil Seed Banks in Two Environments of Forest Restoration Post Bauxite Mining: Native Tree Plantation and Natural Regeneration. **Research in Ecology**, v. 3, n. 1, 2021.
- MIRANDA NETO, Aurino; KUNZ, Sustanis Horn; MARTINS, Sebastião Venâncio; SILVA, Kelly de Almeida; & SILVA, Deideluci Aparecida da. Transposition of soil seed bank as a methodology of forest restoration of abandoned pasture in Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 34, p. 1035-1043, 2010.
- MIRANDA NETO, Aurino; MARTINS, Sebastião Venâncio; SILVA, Kelly de Almeida; & GLERIANI, José Marinaldo. Banco de sementes do solo e serapilheira acumulada em floresta restaurada. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 609-620, 2014.
- MIRANDA NETO, Aurino; MARTINS, Sebastião Venâncio; SILVA, Kelly de Almeida LOPES, Aldo Teixeira; & DEMOLINARI, Raul de Abreu. Banco de sementes em mina de bauxita restaurada no Sudeste do Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- MORO, Marcelo Freire; SOUZA, Vinicius Castro; OLIVEIRA-FILHO, Ary Teixeira de; QUEIROZ, Luciano Paganucci de; FRAGA, Claudio Nicoletti de; RODAL, Maria Jesus Nogueira; ... & MARTINS, Fernando Roberto. Alienígenas na sala: o que fazer com espécies exóticas em trabalhos de taxonomia, florística e fitossociologia?. **Acta botânica brasílica**, v. 26, n. 4, p. 991-999, 2012.
- MUELLER DOMBOIS, Dieter; ELLENBERG, Heinzcoaut. **Aims and methods of vegetation ecology**. No. 581.5 M8. 1974.
- OKSANEN, Jari, BLANCHET, F. Guillaume, FRIENDLY, Michael, KINDT, Rick, LEGENDRE, Pierre, ..., & WAGNER, Hermann. (2018). **'Vegan': Community Ecology Package**. R package version 2.4-6. 2018.
- OLIVEIRA, Tiago José Freitas de; BARROSO, Deborah Guerra; ANDRADE, Aluísio Granato de; FREITAS, Ismael Lourenço Jesus; AMIM, Reynaldo Tancredo. Banco de sementes do solo para uso na recuperação de matas ciliares degradadas na região noroeste fluminense. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 206-217, 2018.
- PIELOU, Evelyn Chrystalla. **Ecological diversity**. New York: Jonhon Willey, 1975. 165p.
- PILOCELLI, Aline. Bioindicadores para monitoramento da restauração de áreas impactadas pelo rompimento da barragem de fundão, Mariana, Minas Gerais. **Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa**. Orientador: Sebastião Venâncio Martins. 2020.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R version 4.1.0. – In. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. 2021.
- REFLORA, Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Lista de espécies da flora do Brasil. **Rio de Janeiro**, 2021.
- RIBEIRO, Terezinha de Oliveira; BAKKE, Ivonete Alves; SOUTO, Patrícia Carneiro; BAKKE, Olaf Andreas; & LUCENA, Danielly da Silva. Seed bank diversity in

- different managed areas of caatinga in the semiarid region of Paraíba state, Brazil. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 203-213, 2017.
- RODRIGUES, Bruna Dias; MARTINS, Sebastião Venâncio; LEITE, Hélio Garcia. Avaliação do potencial da transposição da serapilheira e do banco de sementes do solo para restauração florestal em áreas degradadas. **Revista Árvore**, v. 34, n. 1, p. 65-73, 2010.
- ROMANELLI, João Paulo; MELI, Paula; SANTOS, João Paulo Bispo; JACOB, Igor Nogueira; SOUZA, Lukas Rodrigues; RODRIGUES, André Vieira; ... & RODRIGUES, Ricardo Ribeiro. Biodiversity responses to restoration across the Brazilian Atlantic Forest. **Science of The Total Environment**, p. 153403, 2022.
- ROSENFELD, Milena Fermina; MÜLLER, Sandra Cristina. Ecologia funcional como ferramenta para planejar e monitorar a restauração ecológica de ecossistemas. **Oecologia Australis**, v. 24, n. 3, p. 550-565, 2020.
- SHEPHERD, G.J. **Fitopac 2.1 - 2.85. - Manual do usuário**. Campinas, Departamento de Botânica, Universidade Estadual de Campinas, 2010.
- SANTOS, Danielle Melo dos; SILVA, Kleber Andrade da; SANTOS, Josiene Maria Falcão dos & ARAÚJO, Elcida de Lima. Soil seed bank and its importance in the natural regeneration of degraded areas. **Ethnobiology and Conservation**, v. 7, 2018.
- SER. Society for Ecological Restoration International Science e Policy Working Group. **The SER primer in ecological restoration** (Version 2). 2004.
- SILVA, Ariane Cristine Araujo; MARTINS, Sebastião Venâncio; BALESTRIN, Diego. Soil seed bank as a bioindicator to identify invasive species. **Floresta**, v. 51, n. 3, p. 760-766, 2021.
- SILVA, Carolina Viana; MARTINS, Sebastião Venâncio; VILLA, Pedro Manuel; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; & NABETA, Fabio Haruki. Banco de semillas de relaves mineros como indicador de recuperación de vegetación en Mariana, Brasil. **Revista de Biología Tropical**, v. 69, n. 2, p. 700-716, 2021.
- SILVA, Kelly de Almeida; MARTINS, Sebastião Venâncio; MIRANDA NETO, Aurino; & LOPES, Aldo Teixeira. Soil seed banks in a forest under restoration and in a reference ecosystem in Southeastern Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n.4, 2019.
- SOARES, João Juarez; LAURITO, Sabrina Ferreira. Seasonal semidecidual forest fragment soil seed bank and it's relationship with conservation. **Revista Árvore**, v. 41, n.3, 2018.
- SOUZA, Silvana Cristina Pereira Muniz de; GANDOLFI, Sergius; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro. The influence of the vegetation cover and the remnant forest distance in the natural regeneration process in a Dense Montane Ombrophilous Forest. **Hoehnea**, v. 45, p. 55-68, 2018.
- THE PLANT LIST. Version 1. URL: <http://www.theplantlist.org/> [accessed 10 December 2021].
- VAN DER PIJL, Leendert. Principles of dispersal. **Berlin: SpringerVerlag**, 225 p., 1982.
- VILLA, Pedro Manuel; MARTINS, Sebastião Venâncio; PILOCELLI, Aline; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; & NABETA, Fábio Haruki. Attributes of stand-age-dependent forest determine technosol fertility of Atlantic forest re-growing on mining tailings in Mariana, Brazil. **Journal of Forestry Research**, v. 33, n. 1, p. 103-116, 2022.

Capítulo III: Efeito de técnicas de preparo do solo sobre plantio de restauração florestal em áreas sobre influência de rejeito, no município de Barra Longa, Minas Gerais, Brasil.

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito das técnicas de preparo do solo (com ou sem subsolagem) sobre a resistência do solo à penetração e sobre o incremento em altura e diâmetro ao nível do solo (DNS) ao longo do tempo em mudas nativas em plantios de restauração sobre o Tecnosolo em Barra Longa, Minas Gerais. Com esse propósito, após cerca de 4 meses da realização dos plantios nessas áreas, foram instaladas de forma sistemática 28 parcelas permanentes de 9 x 12 m, estando 14 em área onde foi realizada subsolagem do solo e 14 em área sem subsolagem do solo, sendo estes os dois tratamentos considerados. Entre o 4º e o 15º mês após o plantio das mudas foram realizadas três avaliações, onde foram coletados dados de altura e DNS de todas as mudas localizadas dentro das parcelas. Com estes dados foram calculados os incrementos em altura e DNS para os dois tratamentos. Além disso, também foram coletados dados de resistência do solo à penetração em duas estações distintas (seca/chuvoso). Foram encontradas diferenças significativas entre as médias de resistência do solo à penetração dentro dos tratamentos e entre tratamentos, considerando os dois períodos avaliados. Os valores médios obtidos, em ordem decrescente, foram: Covas – Seca: 1124,6 kPa; Covas – Chuva: 750,1 kPa; Subsolagem – Seca: 543,5 kPa; Subsolagem – Chuva: 245,3 kPa. Diferenças significativas também foram observadas ao analisar os incrementos em altura e DNS entre os tratamentos ao longo do tempo, com o tratamento com subsolagem apresentando as maiores médias. A realização de subsolagem do solo foi suficiente para promover menores valores de resistência do solo à penetração, o que refletiu no aumento do DNS e da altura média das mudas.

Palavras-chave: Subsolador, espécies nativas, compactação do solo.

Chapter III: Effect of soil preparation techniques in forest restoration planting in areas under the influence of tailings, in the municipality of Barra Longa, Minas Gerais, Brazil.

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of soil preparation techniques (performing subsoiling or not) on soil penetration resistance and on increment in height and diameter at ground level over time in native seedlings in restoration plantings on tailings in Barra Longa, Minas Gerais. For this purpose, after 5 months of planting in these areas, 28 permanent 9 x 12 m plots were systematically installed, 14 in area where soil was subsoiling and 14 in area without subsoiling. Between the 4th and 15th month after planting the seedlings, three evaluations were performed, in which the height and diameter at ground level of all seedlings located within the plots were measure. In addition, soil resistance to penetration data were collected in two distinct seasons (dry/rainy). Significant differences were found between the means of soil resistance to penetration within treatments and between treatments, considering the two periods evaluated. The average values obtained, in descending order, were: without subsoiling – Dry: 1124.6 kPa; without subsoiling – Rain: 750.1 kPa; subsoiling – Dry: 543.5 kPa; subsoiling – Rain: 245.3 kPa. Significant differences were also observed when analyzing the increments in height and diameter at ground level between treatments over time, with Subsoiling showing the highest averages. Subsoiling the soil was sufficient to promote lower values of soil resistance to penetration, which reflected in the increase in diameter at ground level and average height of the seedlings.

Keywords: Subsoiler, native species, soil compaction.

1. Introdução

Com o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, muitos investimentos têm sido realizados pela Fundação Renova e seus parceiros buscando a restauração das áreas afetadas direta e indiretamente pelo rejeito (MARTINS et al., 2020; VILLA et al., 2021). Diversos métodos e técnicas de restauração ativa e passiva estão sendo utilizadas e recomendadas para as diferentes situações encontradas em campo, entre elas: o reflorestamento com plantio em área total com mudas de espécies nativas, técnicas de nucleação, condução da regeneração natural e restauração passiva (MARTINS et al., 2020; CAMPANHARO et al., 2021; SILVA et al., 2021). A definição da técnica a ser utilizada em determinada área a ser restaurada está diretamente ligada com as características específicas do local, não existindo uma metodologia padrão a ser aplicada (MARTINS et al., 2015; OLIVEIRA & ENGEL, 2017; TRENTIN et al., 2018).

Em grande parte dos projetos de restauração em florestas tropicais as técnicas de restauração ativa têm sido mais utilizadas principalmente por promoverem rápida visualização de resultados e serem alternativas para locais onde existem limitações à regeneração natural (CROUZEILLES et al., 2017). Assim, em algumas áreas afetadas pelo rejeito da barragem de Fundão a restauração tem sido realizada pelo plantio de mudas nativas regionais (CAMPANHARO et al., 2020; MARTINS et al., 2020). Porém, mesmo com a utilização de técnicas de restauração ativa, existem diferentes situações que podem impedir ou dificultar o sucesso da restauração dessas áreas (FAO, 2011; CROUZEILLES et al., 2017).

A compactação do solo, por exemplo, é limitante para o desenvolvimento das plantas, afetando fatores como o crescimento radicular, resistência à penetração de raízes, retenção de água, podendo até mesmo tornar o solo mais susceptível à erosão (CAMPANHARO et al., 2021; DA SILVA, 2021). Desta forma, técnicas de preparo do solo como escarificação e subsolagem, podem atuar de forma a diminuir a compactação do solo e aumentar as chances de sucesso da restauração florestal, podendo melhorar os atributos físicos do solo, como a resistência do solo à penetração (SILVA et al., 2016; GONÇALVES et al., 2017; AZEVEDO et al., 2018), favorecendo o crescimento de raízes das mudas plantadas e de regenerantes. Esses resultados podem ser confirmados através do monitoramento da área.

Todo projeto de restauração florestal que busque alcançar bons resultados, necessita da avaliação da área reflorestada em espaços regulares de tempo, buscando evitar a ocorrência de imprevistos que possam prejudicar a restauração da área, e conseqüentemente, a perda de tempo e recursos investidos para tanto (BRANCALION et al., 2015; SILVA et al., 2016; MIRANDA NETO et al., 2017). Além disso, realizar o monitoramento das áreas também é uma

importante ferramenta para identificar as técnicas de restauração mais eficientes para cada ambiente, definir as atividades de manejo, verificar a necessidade de replantio e enriquecimento de espécies, bem como auxiliar na seleção de espécies e na melhoria das técnicas a serem empregadas em futuros projetos de restauração (SCHIEVENIN et al., 2012; RECH et al., 2015).

Para tanto, no monitoramento de uma área em restauração diversos parâmetros podem ser utilizados como indicadores, entretanto, espera-se que sejam utilizados aqueles que forneçam as informações necessárias e com custos aceitáveis, podendo ser utilizados isoladamente ou em conjunto (ALMEIDA & SÁNCHEZ, 2005). De uma maneira geral, os indicadores mais utilizados são focados na estrutura da vegetação, como o incremento em altura e DAP (diâmetro à altura do peito), ou na composição, através da diversidade de espécies vegetais da área em restauração (RIGUEIRA & NETO, 2013; RECH et al., 2015; LIMA et al., 2016; SILVA et al., 2016), sendo a ausência destes nos projetos de restauração, um problema frequentemente ainda encontrado na prática (BRANCALION et al. 2015).

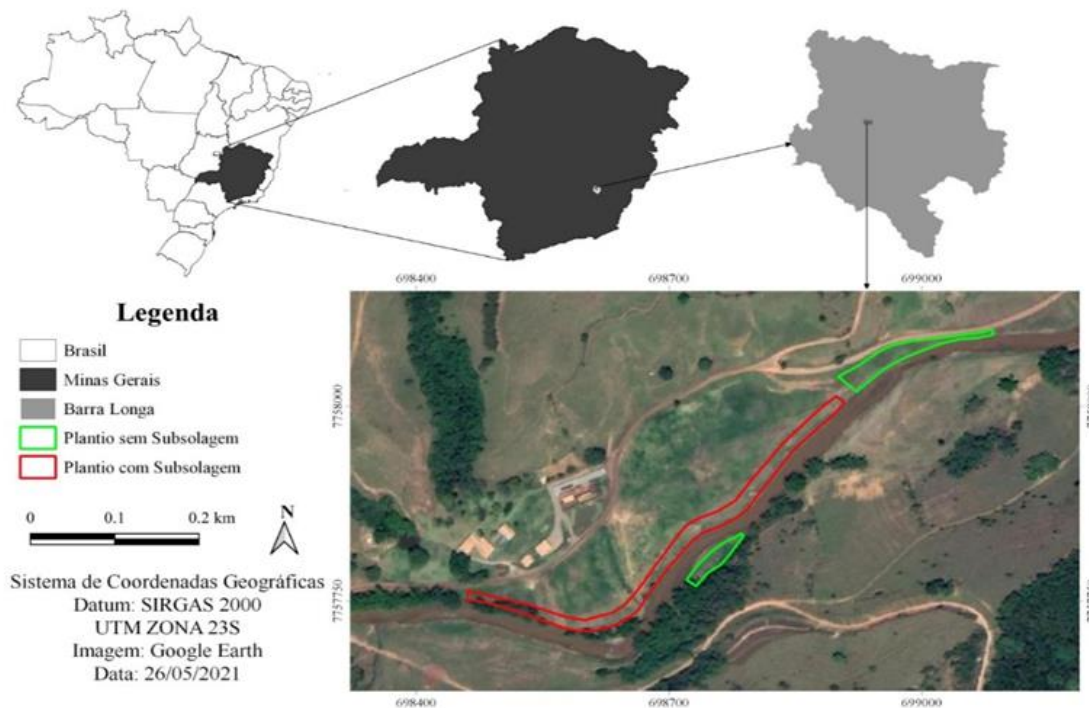
Diante disso, este estudo avaliou o efeito das técnicas de preparo do solo (com ou sem subsolagem) sobre a resistência do solo à penetração e no incremento em altura e diâmetro em mudas nativas localizadas em plantios de restauração sobre o rejeito em Barra Longa, Minas Gerais, Brasil, mediante monitoramento dos plantios.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado em áreas atingidas pelo rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, localizadas no município de Barra Longa (20° 16' 58" S e 43° 02' 27" O), na Zona da Mata Mineira em Minas Gerais, dentro dos limites da Área I de atuação da Fundação Renova (Figura 17). A altitude média do município é de 400 m e o clima é típico tropical de altitude úmido (Cwa) com verões quentes e maior frequência de chuvas nessa estação, com pluviosidade média anual igual a 1400 mm (REIS, 2007). Barra Longa está inserida no bioma Mata Atlântica sendo a Floresta Estacional Semidecidual a vegetação predominante (IBGE, 2012).

Figura 9 - Localização da área do estudo, no município de Barra Longa, MG, com destaque colorido dos tratamentos com e sem subsolagem.



2.2. Plantio das mudas e preparo do solo

Aproximadamente cinco anos após o rompimento da barragem de Fundão, entre os meses de dezembro de 2020 e janeiro de 2021 foram realizadas as atividades de plantio na área localizada às margens do Rio Gualaxo do Norte. Nos locais onde foi possível realizar o acesso de máquinas, foi realizada a subsolagem das camadas iniciais do solo (0 a 40 cm), em sulcos paralelos ao curso do rio, onde posteriormente foram implantadas as linhas de plantios. Nas áreas onde não foi possível o acesso de máquina para subsolagem do solo, foi realizado o plantio convencional das mudas, com abertura manual de covas de dimensões de 30x30x30 cm. Os tratamentos foram denominados: “Subsolagem” e “Covas”.

As demais atividades de manejo nas áreas realizadas antes e após o plantio das mudas, como espaçamento, adubações, coroamento e controle de formigas cortadeiras, foram padronizadas para os dois ambientes. Na seleção das espécies foram utilizadas no plantio mudas nativas produzidas na própria região, tendo sido utilizadas no plantio mais de 40 espécies (Anexo 1).

2.3. Monitoramento dos plantios

Para monitoramento das mudas, foram instaladas de forma sistemática 28 parcelas permanentes de 9 x 12 m. As parcelas foram distribuídas paralelamente ao leito do rio em áreas com plantio de mudas nativas, estando 14 em área onde foi realizada subsolagem do solo e 14 em área sem subsolagem do solo, sendo todas demarcadas com estacas permanentes de PVC e georreferenciadas com GPS, visando possibilitar o monitoramento de longo prazo. Nestas parcelas foram executados os estudos de avaliação e monitoramento do plantio, que foram realizados em três períodos, sendo eles 4 meses (tempo 1), 9 meses (tempo 2) e 15 meses (tempo 3) após o plantio das mudas.

Nas avaliações, mensurou-se a altura e diâmetro no nível do solo (DNS) de todas as mudas localizadas dentro dos perímetros delimitados pelas parcelas, sendo os indivíduos identificados a nível de espécie (Figura 18). Com os dados coletados foi avaliada a variação de altura e DNS ao longo do tempo, considerando dados desde a avaliação inicial até a avaliação final.

Figura 18. Algumas das áreas em restauração com plantio de mudas em área total, Barra Longa, MG.





2.4. Avaliação da resistência do solo à penetração

Os dados de compactação do solo foram obtidos por intermédio do Medidor Eletrônico de Compactação do Solo Falker® (penetrômetro), na profundidade de 0 a 40 cm. O penetrômetro indica o valor da resistência do solo à penetração a cada centímetro de profundidade. Foram realizadas medições em dois períodos distintos, sendo o primeiro caracterizado pela estação seca na região (maio 2021) e outro durante o período de chuvas (novembro de 2021). Em cada uma das medições todas as parcelas foram amostradas em três pontos, sendo esses alocados aleatoriamente sobre as linhas de plantio e próximos às mudas.

2.5. Análise dos dados

Para os incrementos em altura e DNS das mudas, testou-se a distribuição normal com o teste Shapiro-Wilk, e a homogeneidade da variância pelo teste de Bartlett usando o pacote “dplyr” (CRAWLEY, 2013). Para comparar o incremento da altura e DNS ao longo do tempo (t1, t2, t3) em cada tratamentos utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis, e para analisar as diferenças entre os tratamentos (métodos de manejo) para cada tempo de crescimento realizou-se o teste de Wilcoxon (CRAWLEY, 2013). As análises estatísticas foram realizadas no progra-

ma R (R CORE TEAM, 2020).

Para analisar o efeito das técnicas de preparo do solo sobre a resistência do solo à penetração, realizou-se teste F considerando dados entre os tratamentos e dentro dos tratamentos e entre as estações (chuva ou seca) avaliadas. Posteriormente realizou-se o teste t de Student para duas amostras independentes, no nível de 5% de significância.

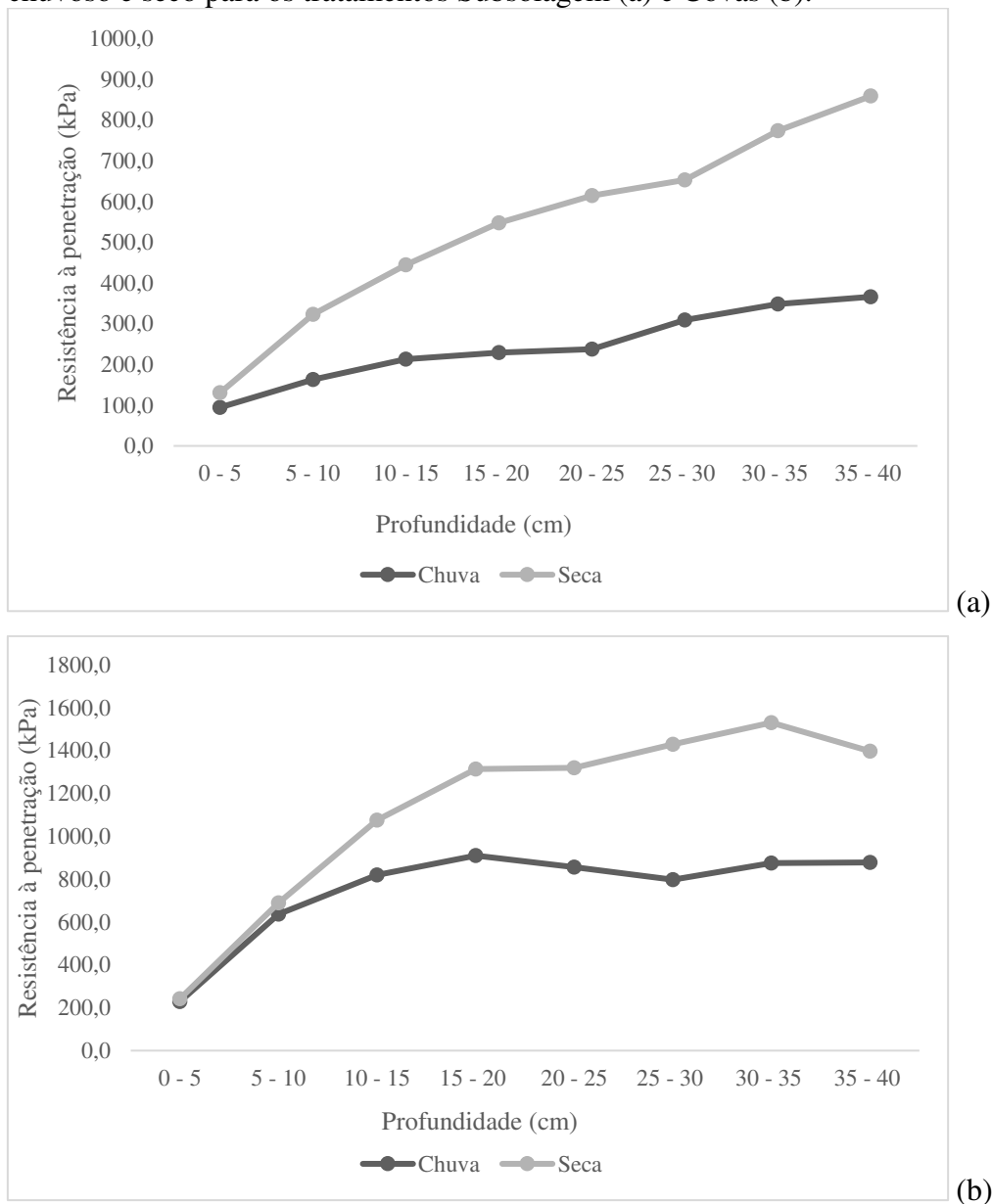
3. Resultados

3.1. Resistência do solo à penetração

Foram encontradas diferenças significativas entre as médias de resistência do solo à penetração dentro dos tratamentos e entre tratamentos, considerando os dois períodos avaliados. Os valores médios obtidos, em ordem decrescente, foram: Covas – Seca: 1124,6 kPa; Covas – Chuva: 750,1 kPa; Subsolagem – Seca: 543,5 kPa; Subsolagem – Chuva: 245,3 kPa. O valor máximo de resistência à penetração foi 2744,0 kPa, obtido no tratamento sem subsolagem durante o período de seca na profundidade de 10 – 15 cm. Para o tratamento com subsolagem do solo, o maior valor foi registrado também no período de seca, sendo este 1850,5 kPa na profundidade de 35 – 40 cm.

Comparando os dados considerando a estação do ano avaliada, foram encontradas diferenças significativas nos dois tratamentos. Nas parcelas com subsolagem do solo, os valores médios variaram entre 94,6 kPa (0 – 5 cm) e 366,3 kPa (35 – 40 cm) no período chuvoso e 130,4 kPa (0 – 5 cm) e 859,4 kPa (35 – 40 cm) na estação seca, apresentando uma tendência crescente de resistência à penetração de acordo com a profundidade do solo (Figura 19a). Por outro lado, no tratamento “Covas” as maiores médias de compactação não foram obtidas na camada mais profunda do solo (35 – 40 cm). Os valores variaram de 229,1 kPa (0 – 5 cm) a 910,0 kPa (15 – 20 cm) durante o período chuvoso e de 242,5 kPa (0 – 5 cm) a 1530 kPa (30 – 35 cm) no período de seca (Figura 19b).

Figura 109 - Valores médios de resistência do solo à penetração obtidos durante os períodos chuvoso e seco para os tratamentos Subsolação (a) e Covas (b).

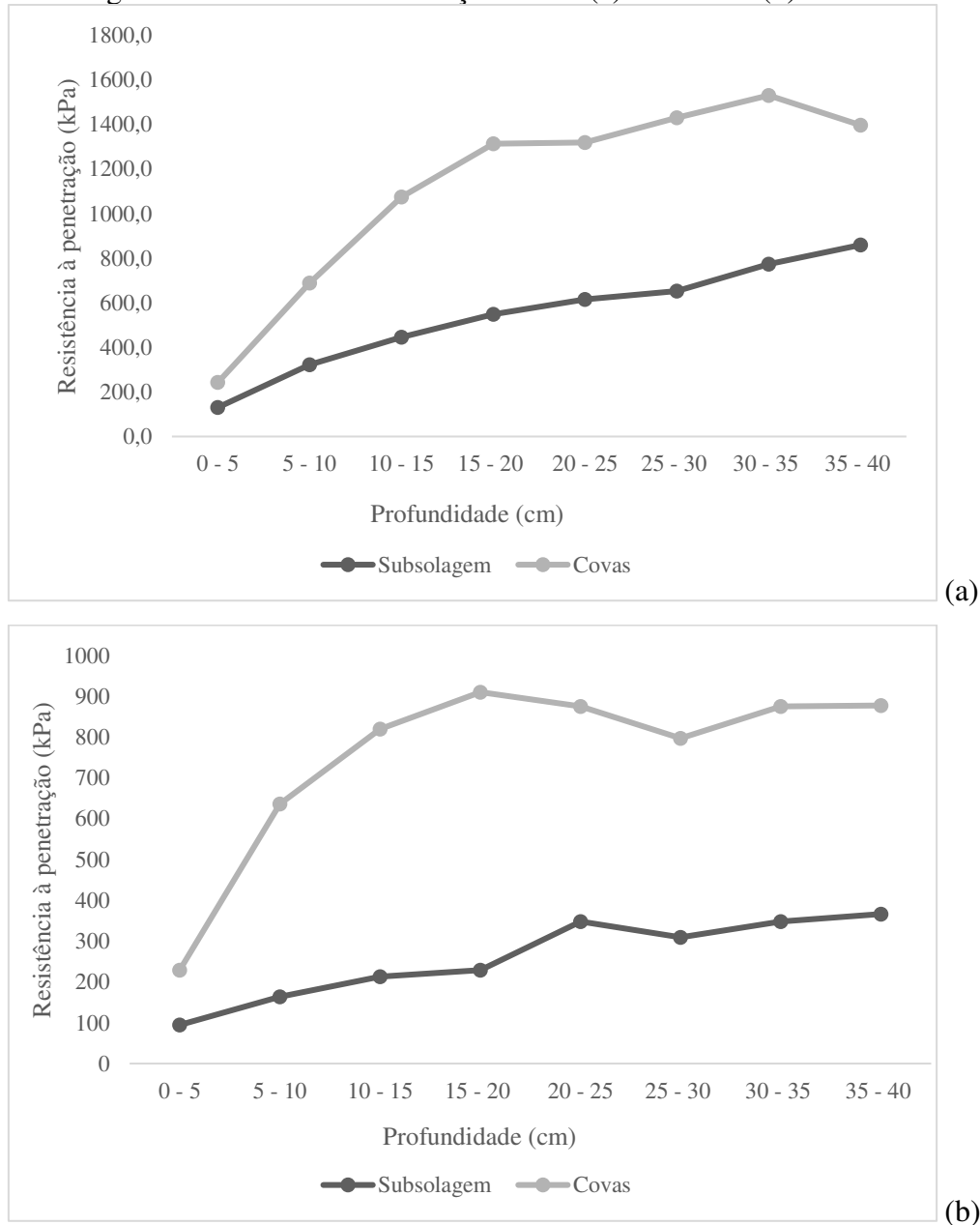


Considerando os valores médios de resistência à penetração do solo entre os tratamentos nos dois períodos avaliados, também foram encontradas diferenças significativas entre os dados. As parcelas subsoladas obtiveram os menores valores médios em todas as profundidades analisadas nos dois períodos.

Durante a estação seca os menores valores médios para os dois tratamentos foram obtidos na camada de 0 a 5 cm, sendo 130,4 kPa (Subsolação) e 242,5 kPa (Covas), enquanto a maior média do tratamento Subsolação foi obtida na profundidade de 35 – 40 cm (859,4 kPa) e do tratamento Covas na profundidade de 30 – 35 cm (1530,5 kPa) (Figura 20a). No período

chuvoso as médias foram menores, variando entre 94,6 kPa (0 – 5 cm) e 366,3 kPa (35 – 40 cm) nas parcelas subsoladas e entre 229,1 kPa (0 – 5 cm) e 910,0 kPa (15 – 20 cm) (Figura 20b).

Figura 20 - Valores médios de resistência do solo à penetração obtidos para os tratamentos Subsolação e Covas durante as estações: seca (a) e chuvosa (b).



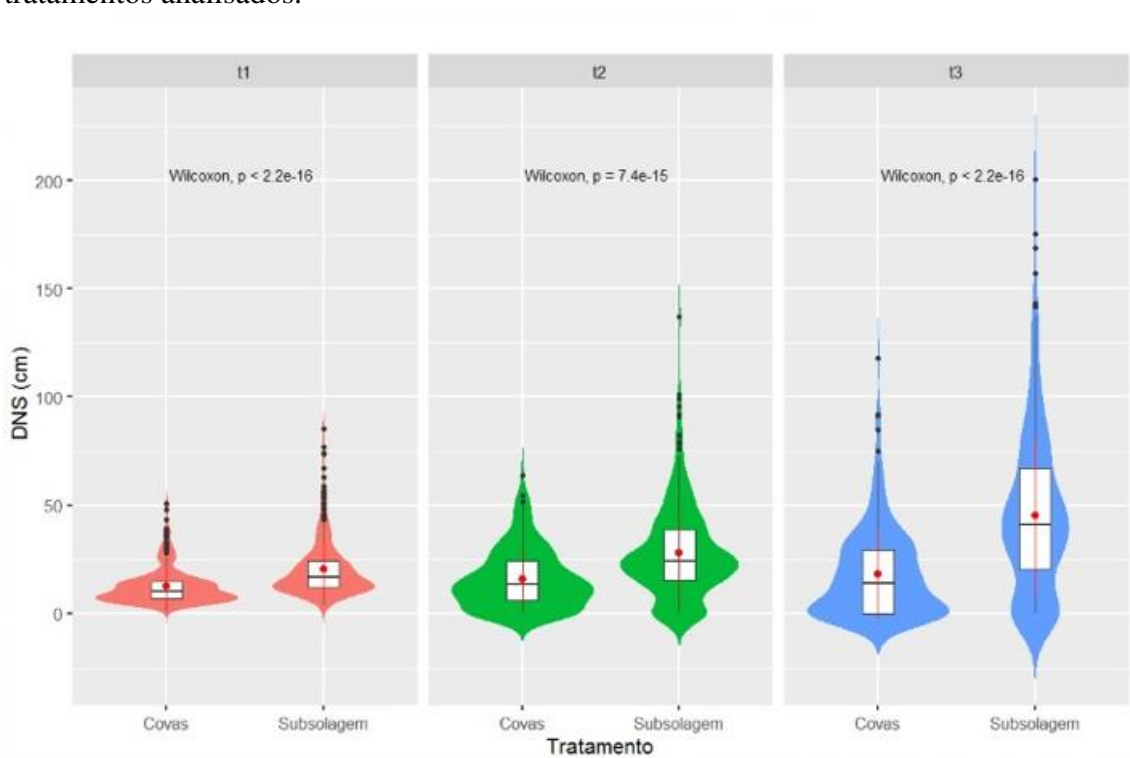
3.2. Incrementos em DNS e altura

Diferenças significativas foram observadas ao analisar os incrementos em altura e DNS das mudas entre os tratamentos ao longo do tempo, com o tratamento subsolação apresentando as maiores médias. No tempo 1, o tratamento Covas apresentou média de DNS igual

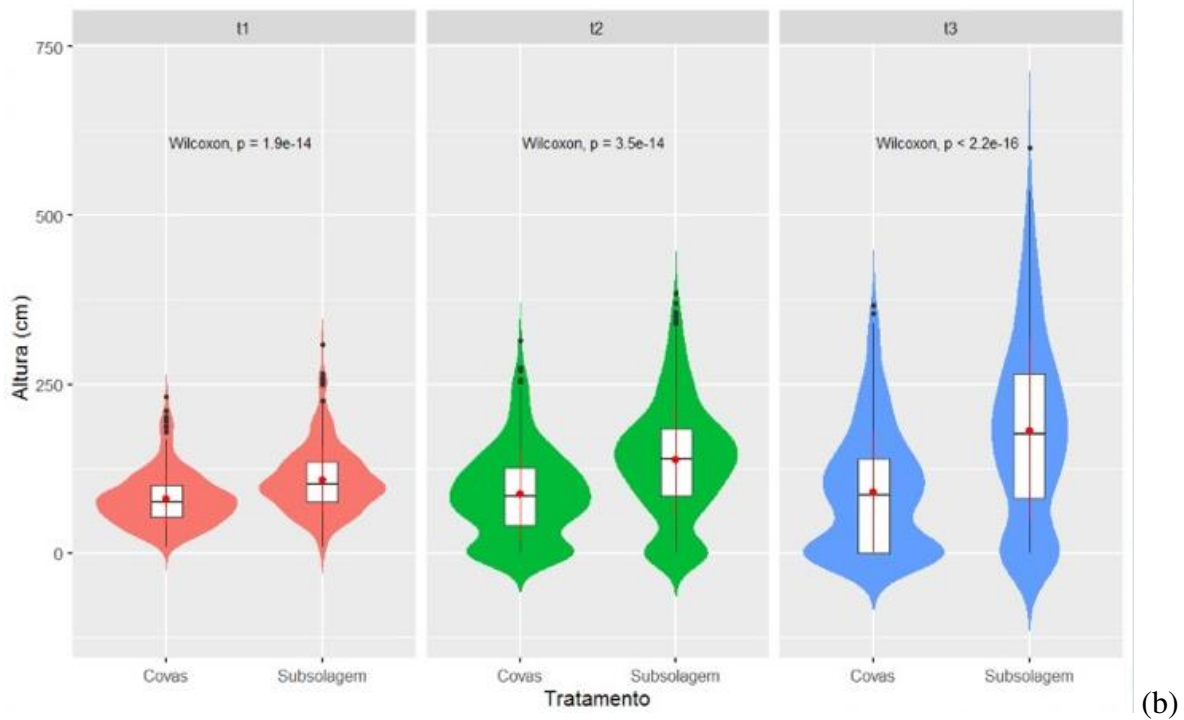
a 12,65 mm e o tratamento com subsolagem média de média de 20,52 mm (Wilcoxon, $p < 2.2e-16$). No tempo 2, a média de DNS foi de 15,71 mm para as mudas do tratamento Covas e de 27,98 mm para as mudas plantadas em área com subsolagem do solo (Wilcoxon, $p = 7.4e-15$). Por fim, no tempo 3 o tratamento Covas apresentou média de DNS de 18,04 mm, valor bem abaixo da média de 45,32 mm obtida pelo tratamento subsolagem (Wilcoxon, $p < 2.2e-16$) (Figura 21a).

Em relação às diferenças nas médias de altura ao longo do tempo, no tempo 1 as mudas pertencentes ao tratamento Covas obtiveram média de 80,20 cm e as mudas do tratamento Subsolagem de 108,78 cm (Wilcoxon, $p = 1.9e-14$). No tempo 2, o maior acréscimo em altura foi observado para o tratamento com subsolagem, chegando a 137,35 cm, enquanto para o tratamento sem subsolagem a média de altura aumentou para 86,99 cm (Wilcoxon, $p < 3.5e-14$). Da mesma forma, no tempo 3, a média de altura no tratamento sem subsolagem teve pequeno acréscimo, chegando a 90,65 cm, enquanto as mudas do tratamento com subsolagem tiveram maior incremento, passando a 181,05 cm de média de altura (Wilcoxon, $p = 2.2e-16$) (Figura 21b).

Figura 21 - Diferenças nas médias de DNS (a) e altura (b) ao longo do tempo para os dois tratamentos analisados.



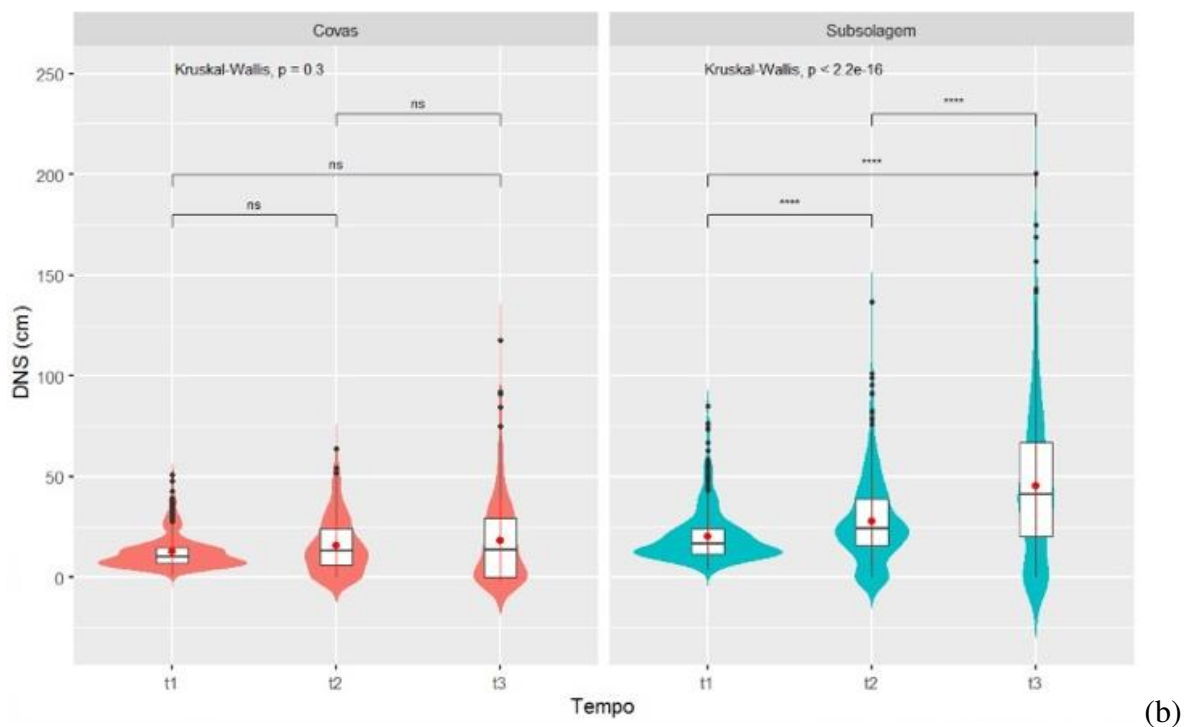
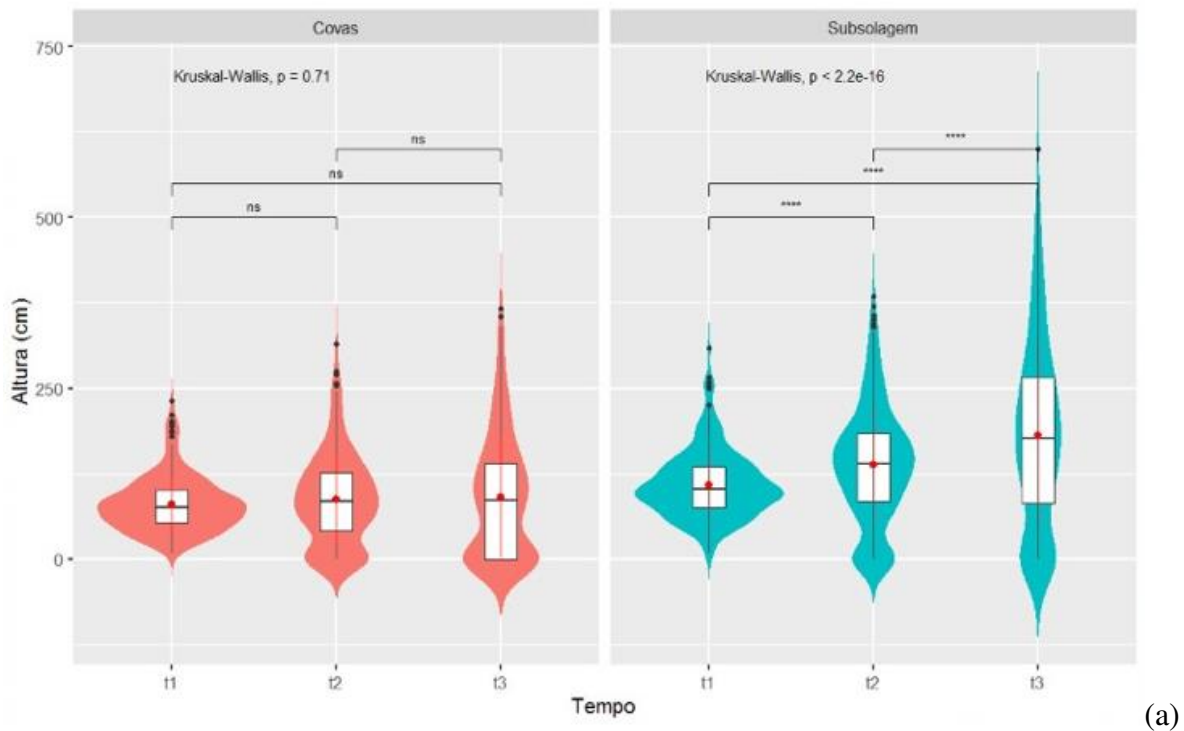
(a)



Considerando a diferença nas médias de altura e DNS dentro dos tratamentos ao longo do tempo foram observadas diferenças significativas entre as médias do tratamento com subsologem do solo em todos os tempos (t1, t2 e t3) em relação à altura (Kruskal-Wallis, $p < 2.2e-16$) e DNS (Kruskal-Wallis, $p < 2.2e-16$). Em contrapartida, para o tratamento com utilização de covas convencionais, não foram observadas diferenças significativas nas médias de DNS (Kruskal-Wallis, $p = 0,3$) e altura (Kruskal-Wallis, $p = 0,71$) ao longo do tempo de avaliação.

Em relação às médias de altura, o tratamento Subsologem apresentou aumento de 28,57 cm (26%) do t1 para o t2, de 43,69 cm (32%) do t2 para o t3 e de 72,66 cm (66%) do t1 para o t3. Para o mesmo parâmetro, as mudas do tratamento Covas tiveram aumento na média de altura de 6,79 cm (8%) do t1 para o t2, de 3,66 cm (4%) do t2 para o t3 e de 10,44 cm (13%) do t1 para o t3 (Figura 22a). Já para o DNS, o aumento para o tratamento Subsologem foi de 7,47 mm (36%) do t1 para o t2, de 17,33 mm (62%) do t2 para o t3 e de 24,80 mm (121%) do t1 para o t3. Para o tratamento Covas, o incremento de DNS foi de 3,06 mm do t1 para o t2 (+24%), 2,33 mm do t2 para o t3 (15%) e de 5,39 mm do t1 para o t3 (Figura 22b).

Figura 22 - Diferenças nas médias de altura (a) e DNS ao longo do tempo dentro dos próprios tratamentos.



4. Discussão

A resistência do Tecnosolo à penetração foi menor nas parcelas onde foi utilizado o subsolador quando comparada às parcelas onde foi realizada apenas a abertura de covas, sem

preparo do solo. Estes resultados corroboram com outros estudos e evidenciam a eficiência da técnica de subsolagem na redução da compactação nas camadas iniciais do solo (GONÇALVES et al., 2017; MONTEIRO et al., 2017). Além disso, a resistência média obtida para os dois tratamentos nos períodos avaliados ficou abaixo de 2000 kPa, valor considerado como limite crítico para um bom crescimento radicular e conseqüentemente um bom desenvolvimento das plantas em plantios convencionais (MORAES et al., 2014). Portanto, no que diz respeito à compactação, nesta propriedade rural o rejeito já transformado em Tecnosolo não ofereceu impedimento ao desenvolvimento de mudas de espécies nativas plantadas.

Analisando os dados obtidos para o tratamento com subsolagem do solo observou-se uma tendência de aumento da resistência à penetração de acordo com o aumento da profundidade do solo. Este padrão foi descrito em outros estudos e destaca a importância de se conhecer a profundidade crítica do implemento, uma vez que, a partir da profundidade crítica, o subsolador não diminui a compactação do solo (MONTEIRO et al., 2017; THEODORO et al., 2018). Assim, conhecer as características da máquina e do implemento a serem utilizados são fundamentais para definir as técnicas de preparo do solo (ROSA et al., 2011).

Em relação à época de avaliação, os resultados demonstraram que no período de seca a resistência do solo à penetração foi superior ao período úmido em ambos os tratamentos, ou seja, a compactação do solo nessas áreas foi maior no período sem ocorrência de chuvas. Pressupõe-se que os valores encontrados neste estudo foram influenciados pelo teor de água no solo de acordo com o período de coleta dos dados, uma vez que existe uma relação em que quanto maior o teor de água, menor a resistência à penetração, e vice-versa (ASSIS et al., 2009; SOUZA et al., 2013; DA SILVA et al., 2016).

Vale destacar que todos os valores médios obtidos neste estudo foram inferiores ao de trabalho, que assim como o atual estudo, também fora realizado em área sob influência do rejeito da barragem de Fundão, em Mariana, MG. No referido estudo, Campanharo et al. (2021) avaliando o efeito de técnicas de plantio sobre a resistência do solo à penetração, encontraram valores médios de 1731,07 kPa na estação chuvosa e de 3130,98 kPa na estação seca. Além disso, os resultados do presente estudo são também inferiores aos valores encontrados em outros trabalhos similares (TAVARES FILHO & RIBON, 2008; SOUZA et al., 2013; DA SILVA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2017; MORAIS JÚNIOR et al., 2020).

Em relação aos incrementos em altura e DNS, os valores médios e absolutos de incremento ao longo do tempo demonstram que a subsolagem impulsionou o aumento dos parâmetros. O tratamento com subsolagem apresentou médias superiores quando comparado a médias obtidas aos doze meses em estudos realizados com espécies florestais nativas na Mata

Atlântica brasileira, ao passo que o tratamento com covas apresentou médias inferiores comparadas a estes estudos (CHIAMOLERA, ÂNGELO & BOEGER, 2011; SOBANSKI & MARQUES, 2014).

A subsolagem do Tecnosolo promoveu significativamente maiores médias de incremento em altura e DNS das mudas em relação ao tratamento onde não foi realizada a subsolagem, além de ter ocorrido também diferença significativa dentro do próprio tratamento de subsolagem, indicando efeito positivo do tratamento na altura e DNS das mudas ao longo do tempo. Estes resultados demonstram que, ao diminuir a compactação, tal técnica de preparo do solo promove melhores condições para crescimento das raízes e conseqüentemente para o desenvolvimento das mudas (GONÇALVES et al., 2017). Além disso, a realização da subsolagem também tem efeito na diminuição da competição com outras espécies, como, por exemplo, as gramíneas, em decorrência do revolvimento do solo (THEODORO et al., 2018).

O menor incremento em altura e DNS para o tratamento Covas possivelmente está relacionado com a maior resistência do solo à penetração encontrada neste tratamento. De acordo com Da Silva et al. (2021), a compactação do solo tem influência direta na absorção e disponibilização de nutrientes das plantas, refletindo assim no desenvolvimento e produtividade vegetal. Tais fatos puderam ser confirmados durante os trabalhos de campo, onde as parcelas com subsolagem apresentam plantas com maiores alturas e diâmetros.

Em estudo realizado com uma espécie florestal (*Acacia mearnsii* De Wild.), essa diferença do acréscimo em altura e DNS entre as técnicas de preparo do solo também foi observada no período inicial, entretanto, após 24 meses de monitoramento, essas diferenças não foram mais significativas entre os tratamentos analisados (DEDECEK et al., 2007). Resultados como este aumentam a importância de manutenção das atividades de monitoramento nos plantios em longo prazo, visando investigar se o mesmo comportamento ocorrerá nas condições deste estudo.

Cabe destacar que, o plantio das mudas no início da estação chuvosa, além de evitar a perda de mudas pela baixa umidade do Tecnosolo, propicia também uma menor resistência à penetração, facilitando o pegamento e desenvolvimento inicial das mudas, o que fica ainda mais evidente quando se aplica a subsolagem.

No geral, o desenvolvimento das mudas foi excelente, atingido valores médios e máximos muito altos de altura e diâmetro, considerando o pouco tempo decorrido entre o plantio e a última avaliação (15 meses). Estes valores são superiores até mesmo aos encontrados em outros estudos realizados em plantios de restauração florestal em áreas não atingidas por rejeitos, em Minas Gerais e em outras regiões do Brasil (SOUZA et al., 2006; LIMA et al., 2016;

CHIAMOLERA, ÂNGELO & BOEGER, 2011).

5. Conclusões

A realização de subsolagem do Tecnosolo foi eficiente para promover menores valores de resistência à penetração, o que reflete no aumento do DNS e da altura média das mudas. Além disso, os menores valores de resistência são obtidos no período úmido. Apesar dos melhores resultados obtidos no tratamento com subsolagem, os valores de resistência do solo à penetração encontrados para o tratamento Covas ficaram também bem abaixo do limite considerado crítico para um bom desenvolvimento radicular das plantas, portanto o rejeito/Tecnosolo não se configura como um impedimento à restauração florestal destas áreas.

Cabe destacar o excelente desenvolvimento das mudas em um curto período de tempo, desde o plantio e a última avaliação (15 meses), atingindo valores muito elevados de altura e diâmetro. Estes valores resultam da boa qualidade das mudas plantadas, das ações adequadas de plantio (preparo do Tecnosolo, adubações de base, controle formigas cortadeiras, entre outras) e de manutenção (adubações de cobertura, coroamentos ao redor das mudas e replantios quando necessário).

Este excelente desenvolvimento das mudas é fundamental para auxiliar na estruturação do Tecnosolo, evitando processos erosivos, além de contribuir com a melhoria da sua fertilidade e no controle das gramíneas exóticas, através do sombreamento da área.

Ademais, ressalta-se a necessidade de um monitoramento constante dessas áreas, visando acompanhar o desenvolvimento da restauração florestal no longo prazo.

6. Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, Raquel Olímpia Peláez Ocampo; SÁNCHEZ, Luis Enrique. Revegetação de áreas de mineração: critérios de monitoramento e avaliação do desempenho. **Revista Árvore**, v. 29, p. 47-54, 2005.
- ASSIS, Renato L.; LAZARINI, Gilmar D.; LANÇAS, Kleber P.; & CARGNELUTTI FILHO, Alberto. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 29, p. 558-568, 2009.
- AZEVEDO, Aline Damasceno; CAMARA, Rodrigo; FRANCELINO, Marcio Rocha; PEIREIRA, Marcos Gervasio, & LELES, Paulo Sérgio Santos. Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. **Floresta**, v. 48, n. 2, p. 183-194, 2018.
- BRANCALION, Pedro Henrique Santin; VIANI, Ricardo Augusto Gorne; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; & GANDOLFI, Sergius. Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. In: Martins, S.V. (Ed.) **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**, v. 2, p. 262-293, 2012.
- CAMPANHARO, Ítalo Favoreto; MARTINS, Sebastião Venâncio; VILLA, Pedro Manuel; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; & NABETA, Fabio Haruki. Effects of forest restoration techniques on community diversity and aboveground biomass on area affected by mining tailings in Mariana, Southeastern Brazil. **Research in Ecology**, v. 2, n. 4, 2020.
- CAMPANHARO, Ítalo Favoreto; MARTINS, Sebastião Venâncio; VILLA, Pedro Manuel; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; & NABETA, Fabio Haruki. Forest restoration methods, seasonality, and penetration resistance does not influence aboveground biomass stock on mining tailings in Mariana, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, 2021.
- CHIAMOLERA, Larissa De Bortolli; ÂNGELO, Alessandro Camargo; BOEGER, Maria Regina. Crescimento e sobrevivência de quatro espécies florestais nativas plantadas em áreas com diferentes estágios de sucessão no reservatório Iraí-PR. **Floresta**, v. 41, n. 4, 2011.
- CORE TEAM, R. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2018. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.
- CRAWLEY, Michael J. **The R Book**, second ed. Wiley, London. 977 p. 2013.
- CROUZEILLES, Renato; FERREIRA, M. S., CHAZDON, R. L., LINDENMAYER, D. B., SANSEVERO, J. B., MONTEIRO, L., ... & STRASSBURG, B. B. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. **Science advances**, v. 3, n. 11, p. e1701345, 2017.
- DA SILVA, Wininton M. da; BIANCHINI, Aloísio; CUNHA, Cesar A. da. Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 449-459, 2016.
- DA SILVA, Pedro Luan Ferreira. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 3, n. 2, 2021.
- DEDECEK, Renato A.; CURCIO, Gustavo R.; RACHWAL, Marcos F. G.; & SIMON, Augusto A. Efeitos de sistemas de preparo do solo na erosão e na produtividade da acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Ciência Florestal**, v. 17, p. 205-215, 2007.
- DE SOUZA, Elder Barboza; PATROCINIO FILHO, Antonio Pereira; PIMENTA, Wisy Alves; NAGAHAMA, Hideo de Jesus; & CORTEZ, Jorge Wilson. Nota Técnica: Resistência mecânica do solo à penetração em função da sua umidade e do tipo de penetrômetro. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 22, n. 1, p. 67-76, 2014.

- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **State of the World's Forests**. Washington: FAO, 2011. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i2050e.pdf>.
- GOEL, Manish Kumar; KHANNA, Pardeep; KISHORE, Jugal. Understanding survival analysis: Kaplan-Meier estimate. **International journal of Ayurveda research**, v. 1, n. 4, p. 274, 2010.
- GONÇALVES, Saulo Boldrini; LOPES, Eduardo Silva; FIEDLER, Nilton Cesar; CAVALIERI-POLIZELI, Karina Maria Vieira; & STAHL, James. Resistência do solo a penetração em diferentes profundidades de subsolagem. **Nativa**, v. 5, n. 3, p. 224-229, 2017.
- HADLEY, W. **R ggplot2 package: an implementation of the grammar of graphics**. 2015. Disponível em: <http://ggplot2.org>
- HOFFMANN, William A.; POORTER, Hendrik. Avoiding bias in calculations of relative growth rate. **Annals of botany**, v. 90, n. 1, p. 37-42, 2002.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2nd ed. Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2012.
- LEY-LÓPEZ, Juan Manuel; AVALOS, Geraldo; CHACÓN-MADRIGAL, Eduardo. Crescimento de mudas e sobrevivência de cinco espécies de árvores em florestas secundárias e pastagens adjacentes nas florestas tropicais montanhosas do sul da Costa Rica. **Revista de Biologia Tropical**, v. 64, n. 4, pág. 1565-1583, 2016.
- LIMA, Pedro Augusto Fonseca; GATTO, Alcides, ALBUQUERQUE, Lidiamar Barbosa; MALAQUIAS, Juaci Vitoria, & AQUINO, Fabiana de Gois. Crescimento de mudas de espécies nativas na restauração ecológica de matas ripárias. **Biologia Neotropical e Conservação**, v. 11, n. 2, pág. 72-79, 2016.
- MARTINS, Sebastião Venâncio; MIRANDA NETO, Aurino; RIBEIRO, Tiago Maciel. 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, 2015.
- MIRANDA NETO, Aurino; MARTINS, Sebastião Venâncio; SILVA, Kelly de Almeida; LOPES, Aldo Teixeira; & DEMOLINARI, Raul de Abreu. Banco de sementes em mina de bauxita restaurada no Sudeste do Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 24: e00125414, 2017.
- MONTEIRO, Mario Augusto Chaves; ZOZ, André; LIMEDE, Arnaldo Cintra; OLIVEIRA, Carlos Eduardo da Silva; & ZOZ, Tiago. Efeito do preparo do solo com diferentes implementos sobre a resistência do solo à penetração. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 2, p. 63-68, 2017.
- MORAES, Moacir Tuzzin; DEBIASE, Henrique; CARLESSO, Reimar; FRANCHINI, Julio Cezar; & DA SILVA, Vanderlei Rodrigues. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 288-298, 2014.
- MORAIS JUNIOR, Vicente Toledo Machado; JACOVINE, Laercio Antonio Gonçalves; ALVES, Eliana Bonaventura Bernardes Moura; TORRES, Carlos Moreira Miquelino Eleto; FAUSTINO, Isabella Salgado; FRANÇA, Luciano Cavalcante de Jesus, ... & ALCANTARA-DE LA CRUZ, Ricardo. Crescimento e sobrevivência de espécies arbóreas potenciais para compensação de carbono em áreas degradadas do sudeste do Brasil. **Indicadores Ecológicos**, v. 117, p. 106514, 2020.
- OLIVEIRA, Renata Evangelista; ENGEL, Vera Lex. A restauração florestal na Mata Atlântica: três décadas em revisão. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 40-48, 2017.

- RECH, Carla Carolina Chini; SILVA, Ana Carolina da; HIGUCHI, Pedro; SCHIMALSKI, Marcos Benedito; PSCHIEDT, Francieli; SCHMIDT, Arthur Bratti; ... & LOEBENS, Rodineli. Avaliação da restauração florestal de uma APP degradada em Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 194-203, 2015.
- REIS, Ruiبران Januário dos Reis. **Mapeamento a climatologia das descargas atmosféricas em Minas Gerais utilizando dados de 1989 a 2002—uma análise exploratória. 2005. 131f.** Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Geografia)-Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- RIGUEIRA, Dary Moreira Gonçalves; MARIANO-NETO, Eduardo. Monitoramento: uma proposta integrada para avaliação do sucesso em projetos de restauração ecológica em áreas florestais brasileiras. **Revista Caititu, Salvador**, v. 1, n. 1, p. 73-88, 2013.
- ROSA, David P.; REICHERT, José M.; MENTGES, Marcelo I.; BARROS, Cláudia A.; REINERT, Dalvan J.; & VIEIRA, Davi. A Cultivo mínimo: efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 1199-1205, 2011.
- SALOMÃO, Rafael Paiva; BRIENZA JÚNIOR, Sílvio; ROSA, Néelson Araújo. Dinâmica de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em unidade de conservação na Amazônia. **Revista Árvore**, v. 38, p. 1-24, 2014.
- SCHIEVENIN, Dimitrio Fernandes, TONELLO, Kelly Cristina, SILVA, Diego Aleixo, VALENTE, Roberta de O. A., FARIA, Luis Carlos de, & THIERSCH, Cláudio Roberto. Monitoramento de indicadores de uma área de restauração florestal em Sorocaba-SP. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 19, n. 1, p. 95-108, 2012.
- SILVA, Kelly de Almeida Martins, Sebastião Venâncio; Miranda Neto, Aurino; Demolinari, Raul de Abreu; & Lopes, Aldo Teixeira. Restauração florestal de uma mina de bauxita: avaliação do desenvolvimento das espécies arbóreas plantadas. **Floresta e Ambiente**, v. 23, p. 309-319, 2016.
- SILVA, Carolina Viana; MARTINS, Sebastião Venâncio; VILLA, Pedro Manuel; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; & NABETA, Fabio Haruki. Banco de semillas de relaves mineros como indicador de recuperación de vegetación en Mariana, Brasil. **Revista de Biología Tropical**, v. 69, nº. 2 P. 700-716, 2021.
- SOBANSKI, Natacha; MARQUES, Marcia C.M. Effects of soil characteristics and exotic grass cover on the forest restoration of the Atlantic Forest region. **Journal for Nature Conservation**, v. 22, n. 3, p. 217-222, 2014.
- SOUZA, Carlos Alberto Martinelli; OLIVEIRA, Rone Batista; MARTINS FILHO, Sebastião; & LIMA, Julião Soares de Souza. Crescimento em campo de espécies florestais em diferentes condições de adubações. **Ciência Florestal**, v. 16, p. 243-249, 2006.
- TAVARES FILHO, João; RIBON, Adriana Aparecida. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 487-494, 2008.
- THEODORO, Gustavo de Faria; GOLIN, Henrique de Oliveira; REZENDE, Rafael Padilha; ABREU, Victor Luan Silva; & SILVA, Marcio Santos. Influência de sistemas de preparo na manutenção da palhada e resistência do solo à penetração. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 5, n. 2, p. 25-30, 2018.
- THERNEAU, Terry M.; LUMLEY, Thomas. Package ‘survival’: Survival Analysis. **R Top Doc**, v. 128, n. 10, p. 28-33, 2015. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/survival/survival.pdf>. 2020.
- TRENTIN, Bruna Elisa; ESTEVAN, Daniela Aparecida; ROSSETTO, Elson Felipe Sandoli; GORENSTEIN, Mauricio Romero; BRIZOLA, Gilmar Poser; & BECHARA, Fernan-

do Campanhã. Restauração florestal na Mata Atlântica: passiva, nucleação e plantio de alta diversidade. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 160-174, 2018.

VILLA, Pedro Manuel; MARTINS, Sebastião Venâncio; PILOCELI, Aline; KRUSCHEWSKY, Gabriel Correa; DIAS, Andreia Aparecida; & NABETA, Fabio Haruki. Atributos da floresta dependente da idade do estande determinam a fertilidade do tecsossolo da Mata Atlântica rebrotando em rejeitos de mineração em Mariana, Brasil. **Journal of Forestry Research** , v. 33, n. 1, pág. 103-116, 2022.

Considerações finais

As áreas atingidas pelo rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão se encontram em diferentes estágios, o que demanda análises criteriosas a respeito das condições dos ambientes estudados para inferir a respeito das técnicas de restauração a serem utilizadas. Para tanto, juntamente com seus parceiros, como o Laboratório de Restauração Florestal da UFV, a Fundação Renova vem conduzindo diversos programas de reparação dos impactos, gerando resultados positivos.

Neste trabalho foi confirmado que o rejeito não está sendo um limitante à recuperação das áreas atingidas, e que as técnicas de restauração utilizadas nas áreas de estudo estão ocasionando melhorias ambientais, como por exemplo, através do retorno da cobertura florestal e aumento da biodiversidade. Além disso, a busca por técnicas inovadoras para restauração dessas áreas, como as bolas de sementes com rejeito proveniente da própria barragem de Fundão, também demonstra a preocupação social desta parceria.

Ficou evidente também que as ações de restauração florestal adotadas promoveram um rápido desenvolvimento das mudas plantadas em área total, com valores muito expressivos em altura e diâmetro, o que foi um diferencial para o sucesso do projeto, ao contribuir para criar melhores condições físico-química do Tecnosolo bem como superar a competição com gramíneas exóticas agressivas.

Por fim, para que estas ações de restauração continuem a produzir resultados positivos no longo prazo, é necessário que se dê continuidade às atividades implantadas e que novas ações sejam executadas através dos resultados obtidos com o monitoramento constante da restauração dessas e de outras áreas atingidas por rejeitos na região de Mariana, MG.

ANEXO

Anexo 1 – Lista de espécies utilizadas nos plantios de restauração em áreas afetadas pelo rejeito da barragem de Fundão, em Barra Longa, Minas Gerais.

Família/Nome científico	Nome popular
Anacardiaceae	
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	Aroeirinha
Arecaceae	
<i>Syagrus romanzoffiana</i> (Cham.) Glassman	Jerivá
Bignoniaceae	
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	ipê-roxo
<i>Handroanthus chrysotrichus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	ipê-amarelo-miúdo
<i>Tabebuia roseoalba</i> (Ridl.) Sandwith	ipe-branco
<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	ipê-tabaco
Cannabaceae	
<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	Crindiúva
Euphorbiaceae	
<i>Croton floribundus</i> Spreng.	Capixingui
<i>Croton urucurana</i> Baill.	sangra-d'agua
<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	Leiteiro
Fabaceae	
<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	Angico
<i>Anadenanthera peregrina</i> (L.) Speg.	angico-vermelho
<i>Apuleia leiocarpa</i> (Vogel) J.F.Macbr.	Garapa
<i>Centrolobium microchaete</i> (Mart. ex Benth.) H.C.Lima	Araruva
<i>Dalbergia brasiliensis</i> Vogel	Caviúna
<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.) Allemão ex Benth.	jacarandá-da-bahia
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	Tamboril
<i>Erythrina verna</i> Vell.	Mulungu
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jatobá
<i>Inga sessilis</i> (Vell.) Mart.	inga-ferradura
<i>Inga vera</i> Willd.	inga-banana
<i>Machaerium nyctitans</i> (Vell.) Benth.	jacarandá-bico-de-pato
<i>Ormosia arborea</i> (Vell.) Harms	olho-de-cabra
<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.) J.F.Macbr.	pau-jacaré
<i>Platypodium elegans</i> Vogel	Jacarandá
<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake	Guapuruvú
<i>Senna macranthera</i> (DC. ex Collad.) H.S.Irwin & Barneby	Fedegoso
<i>Senegalia polyphylla</i> (DC.) Britton & Rose	Monjoleiro
Lamiaceae	
<i>Aegiphila integrifolia</i> (Jacq.) Moldenke	pau-papagaio
Lecythidaceae	
<i>Lecythis lanceolata</i> Poir.	sapucaia-uçu
<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	sapucaia

Continua...

Família/Nome científico	Nome popular
Malvaceae	
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Mutambo
<i>Luehea divaricata</i> Mart.	açoita-cavalo
<i>Pseudobombax grandiflorum</i> (Cav.) A.Robyns	Embiruçu
Meliaceae	
<i>Cabralea canjerana</i> (Vell.) Mart.	Canjarana
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Cedro
Primulaceae	
<i>Rapanea umbellata</i> (Mart.) Mez	Capororoca
Rutaceae	
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i> Lam.	maminha-de-porca
Sapotaceae	
<i>Pouteria caimito</i> (Ruiz & Pav.) Radlk.	Açaí
Solanaceae	
<i>Solanum granulosoleprosum</i> Dunal	fumo-bravo
Urticaceae	
<i>Cecropia hololeuca</i> Miq.	Embaúba
<i>Cecropia glaziovii</i> Snethl.	embaúba-vermelha