

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 14/01/2027

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until January 14, 2027

MARI CARMEN FERNANDEZ ANGULO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE DIFERENTES MODELOS DE RESTAURAÇÃO
FLORESTAL NA SAÚDE DO SOLO**

**Botucatu
2026**

MARI CARMEN FERNANDEZ ANGULO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE DIFERENTES MODELOS DE RESTAURAÇÃO
FLORESTAL NA SAÚDE DO SOLO**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestra em Ciência Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Diego SOTTO
Podadera.

Coorientador: Prof. Dr. João de Andrade
Bonetti.

Botucatu

2026

A594a	Angulo, Mari Carmen Fernandez Avaliação do impacto de diferentes modelos de restauração florestal na saúde do solo / Mari Carmen Fernandez Angulo. -- , 2026 137 p. : il., tabs., fotos, mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, Orientador: Diego Sotto Podadera Coorientador: João de Andrade Bonetti 1. Restauração florestal. 2. Solos tropicais. 3. Conservação da natureza. 4. Fertilidade do solo. 5. Biodiversidade. I. Título.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE DIFERENTES MODELOS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL NA SAÚDE DO SOLO

AUTORA: MARI CARMEN FERNANDEZ ANGULO

ORIENTADOR: DIEGO SOTTO PODADERA

COORDENADOR: JOÃO DE ANDRADE BONETTI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência Florestal, pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br DIEGO SOTTO PODADERA
Data: 15/07/2026 08:54:33-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. DIEGO SOTTO PODADERA (Participação Virtual)

Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA

Documento assinado digitalmente
gov.br DEIVID LOPES MACHADO
Data: 14/07/2026 18:41:06-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. DEIVID LOPES MACHADO (Participação Virtual)

Departamento de Ciências Agrárias / Universidade Federal de Jataí

Documento assinado digitalmente
gov.br RENATA CRISTINA BOVI
Data: 14/07/2026 18:33:07-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a Dr.^a RENATA CRISTINA BOVI (Participação Virtual)

Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA

Botucatu, 14 de julho de 2026.

À minha querida irmã, Mari Cruz, quem esteve
comigo em cada passo deste caminho. Com todo o meu
carinho, dedico.

À minha linda mãe, Rita Susana, e aos meus avós,
Félix e Isabel Cremilda, por me ensinarem a sonhar, mesmo
quando parecia muito distante. Ser a primeira mestre da
minha família é um orgulho. Dedico esta conquista a vocês,
que sonharam comigo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sustenta meus dias, conhece meus anseios e me guiou por este caminho maravilhoso, no qual, mesmo nos momentos mais difíceis, sempre encontrei consolo, força e alegria.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de Financiamento 001. À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, agradeço pelas oportunidades, pelo acolhimento e pelo suporte durante minha formação.

Aos meus orientadores, minha sincera gratidão pela confiança e por acreditarem neste trabalho. Ao meu orientador Diego, pelos ensinamentos, pela paciência, pelas oportunidades de aprendizado e pela acolhida desde antes de minha chegada ao Brasil. Ao meu coorientador João Bonetti, pela disponibilidade, pelas conversas e pelos ensinamentos compartilhados. De ambos, levo o conhecimento adquirido, o exemplo de cuidado com a ciência e a admiração por suas trajetórias. Aos membros da banca, Prof. Deivid Lopes Machado e Profa. Renata Bovi, agradeço pela disponibilidade, pelas valiosas e cuidadosas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Restauração Ecológica e Silvicultura Tropical (RESTROP), minha gratidão pela amizade, pela convivência e pela contribuição para esta pesquisa. Em especial, ao Antônio Wesly, ao Paulo, ao João Paulo e ao Micael, meu carinho e minha sincera gratidão pela amizade, pela parceria e por tudo o que compartilharam comigo ao longo desta caminhada. Ao Antônio Wesly, agradeço também pelo apoio nas coletas de solo; ao Paulo, pela dedicação à coleta dos dados de vegetação. À Mayara, Kauane e João Vitor, pelos inventários realizados em campo, e aos demais colegas do RESTROP que disponibilizaram dados de inventários anteriores, meu sincero agradecimento.

Ao pessoal do laboratório de análises de solo da FCA, especialmente a Sonia e ao José Carlos, agradeço pelos ensinamentos e pelo apoio durante o processamento e a análise das amostras de solo. Aos colegas do Departamento de Solos, especialmente Ana, Lucas, Carla, Oziel e Olavo, aos professores Dirceu e Leonardo Büll e demais colegas, agradeço pelo carinho, pelos aprendizados, pelas risadas e pelos momentos compartilhados ao longo desta etapa.

À Profa. Giselda Durigan, agradeço por uma das primeiras e mais marcantes disciplinas que cursei na pós-graduação, pelo cuidado e pela generosidade ao longo dessa experiência; sua trajetória e sua forma de ser são, para mim, fonte de admiração e inspiração. À Profa. Zezé, pela motivação, pelas oportunidades de aprendizado e pelo carinho; à Profa. Magali e Profa. Carmen Marcati, pelo carinho e pela disponibilidade sempre que precisei; e ao Prof. Danilo Simões, pelo suporte, apoio e

disposição ao longo desta caminhada. Aos demais docentes que fizeram parte desta etapa, agradeço pelas contribuições à minha formação.

À Jamily, minha amiga e companheira de casa, obrigada pelo carinho e por percorrer esta etapa ao meu lado, fazendo com que eu me sentisse em casa mesmo longe. Aos meus queridos amigos Misael, Maicon, Dandara e Bruna, pelo carinho e pelos bons momentos. Aos amigos da pós-graduação, dos laboratórios e dos diferentes espaços, minha gratidão pelo acolhimento e pela escuta. A Andrieli, Bia, Matheus, Vena, Aleixa, Mariana, Débora, Antony Gonzales, Iván Hurtado e Anthony Campos, e a todos que me acompanharam ao longo desta caminhada, agradeço pelo apoio, pelos conselhos e pelas palavras de incentivo.

Ao maravilhoso grupo Yoga Lageado, pelos momentos de aprendizado, leveza e alegria. Em especial, ao professor Carlos Rocha e a todos que compartilharam comigo esse espaço, meu carinho e minha gratidão. A Facundo, Camila Belén e Jazmín, agradeço pelo acolhimento durante minha passagem pela Argentina, tornando essa experiência única e cheia de aprendizados. Ao Dr. Jorge Revilla, por me incentivar a continuar meus estudos de mestrado no Brasil e por acreditar que eu poderia seguir este caminho. Ao Prof. Aparicio Limache e aos demais professores e professoras que fizeram parte de minha formação, agradeço pelos ensinamentos e pela motivação.

À minha mãe, Rita Susana, pelo amor, pelo apoio incondicional e por estar ao meu lado, especialmente nesta etapa final. À minha irmã Mari Cruz, pelo incentivo constante e por contribuir diretamente para este trabalho, ajudando na preparação das amostras de solo. Aos meus avós, Félix e Isabel Cremilda, por me ensinarem a sonhar, por confiarem em mim e por contribuírem para a pessoa que sou. Aos meus irmãos, Fiorela e Daniel, pelas risadas, pela proximidade e pelo afeto, mesmo à distância. Às minhas sobrinhas Yashira, Belén, Kayne e Aixa, e ao meu pequeno sobrinho Aaron, pela alegria que cada momento ao lado deles me trouxe. Às minhas primas Thalia e Lia, pelo carinho e pelo apoio, cada uma à sua maneira. Ao meu amigo José, pela amizade e pelas palavras de incentivo. Aos meus tios, tias e demais familiares, minha sincera gratidão, especialmente ao meu tio José, pelo apoio em vários momentos desta caminhada.

À minha psicóloga, Paola Fonseca, minha sincera gratidão pelo acompanhamento durante grande parte deste processo. Por fim, agradeço a mim mesma, à Mari Carmen que viveu este processo, enfrentou dificuldades, celebrou alegrias, aprendeu e continuou até chegar aqui. Que a Mari do futuro nunca se esqueça dos seus sonhos e tenha coragem e confiança para continuar seguindo-os.

Às minhas raízes e aos caminhos que me trouxeram até aqui.

RESUMO

A saúde do solo é um componente essencial para o sucesso da restauração ecológica, mas ainda é pouco considerada de forma integrada na avaliação de sistemas de restauração. Este estudo comparou o potencial de diferentes sistemas de restauração ecológica implantados há aproximadamente 27 anos sobre a saúde do solo. Foram estudadas duas áreas com solos contrastantes: um Nitossolo Vermelho (Área 1) e um Argissolo Vermelho-Amarelo (Área 2), ambas localizadas em Botucatu, SP. Em cada área foram avaliados os sistemas de Alta Diversidade (DIV), Semeadura Direta (SEM), Controle (CON) e Floresta de Referência (REF), por meio da análise de atributos físicos, químicos e biológicos do solo em diferentes profundidades do perfil, além da estrutura e diversidade da vegetação. A saúde do solo foi avaliada de forma integrada por meio do Índice de Saúde do Solo, calculado com base no protocolo Soil Management Assessment Framework (SMAF). Os resultados mostraram que os atributos do solo responderam de maneira distinta entre as áreas, evidenciando a importância do contexto pedológico na recuperação dos ecossistemas restaurados. No Nitossolo, os atributos físicos não foram influenciados pelo sistema de restauração, enquanto os atributos químicos, o carbono orgânico e o ISS apresentaram respostas dependentes da profundidade. O ISS foi mais elevado nas camadas superficiais, com destaque para o sistema de Alta Diversidade em 0–5 cm, enquanto, em profundidade, as diferenças entre sistemas foram menos consistentes e variaram ao longo do perfil. No Argissolo, os atributos físicos e o ISS responderam aos sistemas de restauração, e os sistemas de restauração ativa alcançaram valores de ISS semelhantes aos observados na Floresta de Referência. As relações entre vegetação e saúde do solo também variaram entre as áreas, sendo mais evidentes no Argissolo do que no Nitossolo. Conclui-se que a restauração ativa contribui para a recuperação da saúde do solo, mas a magnitude e o padrão das respostas observadas variaram conforme o contexto pedológico, os atributos avaliados e as características da vegetação. Os resultados reforçam a importância de considerar o contexto pedológico no monitoramento e na avaliação de iniciativas de restauração ecológica.

Palavras-chave: restauração; ecossistemas; solo; SMAF.

ABSTRACT

Soil health is an essential component for the success of ecological restoration, yet it is still rarely considered in an integrated manner when evaluating restoration projects. This study compared the potential of different ecological restoration systems established approximately 27 years ago on soil health in two areas with contrasting soil types: a Rhodic Nitisol (Area 1) and a Ultisol (Area 2), both located in Botucatu, São Paulo State, Brazil. The evaluated systems were High Diversity Planting (DIV), Direct Seeding (SEM), Control (CON), and Reference Forest (REF). Physical, chemical, and biological soil attributes were analyzed throughout the soil profile (0–100 cm), along with vegetation structural and diversity attributes. Soil health was assessed using an integrated approach through the Soil Health Index, calculated based on the Soil Management Assessment Framework (SMAF) protocol. The results showed that soil attributes responded differently between the two areas, highlighting the importance of soil type in the recovery of restored ecosystems. In the Rhodic Nitisol, physical attributes were not influenced by the restoration system, whereas chemical attributes and soil organic carbon showed differences in the surface layers. In the Ultisol, physical attributes and the SHI responded to the restoration system, and the active restoration systems achieved SHI values similar to those observed in the Reference Forest after 27 years. The relationships between vegetation and soil health also varied according to soil type, being more evident in the Ultisol than in the Nitisol. It is concluded that active restoration contributes to the recovery of soil health; however, the intensity and trajectory of this recovery depend on soil type, the attributes evaluated, and vegetation composition. These findings reinforce the importance of considering the pedological context in both the planning and monitoring of ecological restoration projects.

Keywords: restoration; ecosystems; soil; SMAF.

1 INTRODUÇÃO

A restauração de ecossistemas tem se consolidado nos últimos anos, como um campo de pesquisa e ação de extrema relevância, tornando-se uma prioridade global e abrangendo diversos tópicos que nos permitem compreender o funcionamento dos ecossistemas (Perring *et al.*, 2015; Bizuti *et al.*, 2022). Apesar dos avanços significativos em vários aspectos da restauração de ecossistemas, persistem lacunas críticas de conhecimento, especialmente no que se refere à restauração de atributos da estrutura e do funcionamento dos ecossistemas para além daqueles que se restringem às comunidades vegetais, como a da saúde do solo (De Vasconcelos *et al.*, 2023; Faria *et al.*, 2026; Machado, 2016; Mendes *et al.*, 2019).

O termo saúde do solo foi inicialmente definido por Doran e Parkin (1994) e, ao longo do tempo, passou a incorporar maior complexidade (Tomás, 2022). Mais recentemente, foi definido como a capacidade contínua do solo de manter funções ecológicas essenciais, como a ciclagem de nutrientes e uma estrutura física adequada (Cherubin; Schiebelbein, 2022). Assim, o monitoramento da saúde do solo é fundamental para avaliar como diferentes práticas de manejo influenciam essas funções ao longo do tempo.

O interesse pela saúde do solo tem crescido acentuadamente, o que se reflete na produção científica: 75% dos estudos sobre o tema foram publicados na última década, e 50% nos últimos cinco anos (Cherubin; Schiebelbein, 2022). Apesar desse avanço, seu papel ainda não é suficientemente reconhecido nem integrado às práticas atuais de restauração (De Vasconcelos *et al.*, 2023; Mendes *et al.*, 2019). Como consequência, aspectos importantes relacionados às propriedades físicas, químicas e biológicas do solo ainda são pouco considerados nas avaliações de restauração (Bardgett; Van der Putten, 2014; Eviner; Hawkes, 2008; Wardle *et al.*, 2006). Além disso, o número de estudos que exploram a relação entre saúde do solo e restauração ecológica permanece reduzido, com evidências quantitativas ainda limitadas sobre a recuperação da saúde do solo em áreas restauradas (Faria *et al.*, 2026). Isso evidencia a necessidade de ampliar o conhecimento sobre a saúde do solo, especialmente no que se refere às relações solo-planta-ecossistema e à identificação de indicadores adequados para monitorar os processos de restauração (Raiesi; Salek-Gilani, 2020).

Cientistas e profissionais têm se envolvido cada vez mais em programas de restauração em larga escala para enfrentar desafios ambientais urgentes (Aronson; Alexander, 2013). Paralelamente, tem-se ampliado a compreensão sobre os efeitos da biodiversidade vegetal no funcionamento dos ecossistemas, incluindo a recuperação da biodiversidade e da funcionalidade dos habitats naturais (Machado, 2016), embora ainda haja um longo caminho para alcançar as características de um ecossistema de referência (Rey Benayas *et al.*, 2009).

Nesse sentido, a interação planta-solo constitui uma das relações mais complexas dos ecossistemas, exercendo influência direta sobre sua dinâmica e funcionamento. No caso dos ecossistemas florestais, diversos estudos demonstraram que a composição e as características das espécies vegetais exercem impacto sobre o funcionamento do solo e do ecossistema (Laossi *et al.*, 2008; Machado, 2016; Perring *et al.*, 2015; Vanbergen *et al.*, 2007; Wardle *et al.*, 2006). De Vasconcelos *et al.* (2023) mostraram que algumas propriedades do solo, como atributos físicos relacionados à estrutura e agregação, bem como atributos biológicos associados à macrofauna, podem se recuperar com relativa rapidez, enquanto outros atributos demandam períodos mais longos de recuperação.

A literatura científica também destaca a importância da estrutura da vegetação em processos ecológicos essenciais, como a ciclagem de nutrientes e a dinâmica da matéria orgânica do solo (Celentano *et al.*, 2011; Laossi *et al.*, 2008; Machado, 2016; Scherer-Lorenzen; Bonilla; Potvin, 2007). Nesse sentido, atributos estruturais da vegetação, como densidade de árvores, altura total e área basal, desempenham papel fundamental sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Brancaion *et al.*, 2012). Uma maior densidade arbórea favorece a retenção de água e a estabilidade estrutural do solo, reduzindo a erosão superficial (Barbosa *et al.*, 2018; Gonçalves; Mello, 2015). Por sua vez, a matéria orgânica e as comunidades microbianas, associadas a vegetações diversificadas são essenciais para a ciclagem de nutrientes e para o equilíbrio do ecossistema (Chaer *et al.*, 2014; Godwin Ezekiel *et al.*, 2022).

Além da estrutura, a diversidade de espécies pode influenciar o funcionamento do ecossistema, ao promover maior atividade microbiana, favorecer o armazenamento de carbono e contribuir para a estabilidade ecológica (Bardgett; Van der Putten, 2014; Massensini *et al.*, 2015). As espécies vegetais presentes no sistema e suas características funcionais, incluindo a presença de árvores fixadoras de nitrogênio,

podem melhorar a porosidade, reduzir a densidade do solo e aumentar a disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio e potássio, contribuindo, conseqüentemente, para o aumento da capacidade de troca catiônica (Chaer *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2022). Além disso, a biomassa vegetal é fundamental para a estabilidade estrutural do solo e para a retenção de água, influenciando significativamente a ciclagem de nutrientes como nitrogênio e fósforo. A biomassa também atua como um indicador da saúde do solo, ao promover a atividade microbiana e o armazenamento de carbono (Gao *et al.*, 2022; Saharan *et al.*, 2019).

Embora diversos estudos tenham abordado a saúde do solo com relação às práticas de manejo, às mudanças climáticas, ao aporte de material orgânico, à disponibilidade de nutrientes e à produtividade vegetal (Tomás, 2022), bem como identificado importantes indicadores relacionados às propriedades físicas e químicas do solo (Chaer *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2022), a maior parte desses esforços tem se concentrado em sistemas agrícolas sustentáveis e regenerativos (Bedolla-Rivera *et al.*, 2023; Bonetti *et al.*, 2023; Williams; Colombi; Keller, 2020). Como consequência, ainda persistem lacunas importantes na compreensão do papel da restauração ecológica na recuperação da saúde do solo. Isso evidencia a necessidade de ampliar as pesquisas sobre como diferentes abordagens de restauração influenciam a saúde do solo em longo prazo, especialmente porque comparações diretas entre solos agrícolas e solos de florestas secundárias podem ser inadequadas devido às diferenças contextuais que condicionam suas propriedades e funções. Portanto, fica evidente a necessidade de uma abordagem mais integrativa para avaliar os ecossistemas restaurados (Allele *et al.*, 2023; Simon *et al.*, 2022).

Nesse contexto, tem sido ressaltada a importância de avaliar a saúde do solo por meio de um conjunto de indicadores, que incluam propriedades físicas, químicas e biológicas (Bünemann *et al.*, 2018; Williams; Colombi; Keller, 2020). O uso de indicadores isolados não capta adequadamente a complexidade da saúde do solo, uma vez que um único parâmetro é insuficiente para representar seus múltiplos processos e funções (Tomás, 2022; Wiecheteck, 2021). Embora a maioria dessas abordagens tenha sido aplicada principalmente em sistemas agrícolas, faz-se necessária uma abordagem integradora que permita compreender a saúde do solo em ecossistemas naturais e restaurados (Lopes; Vezzani; Paraguaio, 2023).

Diversas ferramentas de avaliação da saúde do solo permitem quantificar seu funcionamento com relação ao seu potencial máximo e detectar alterações induzidas

por diferentes usos da terra e práticas de manejo (Cherubin; Schiebelbein, 2022). O protocolo *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) baseia-se em três etapas: seleção de indicadores; interpretação dos indicadores (Andrews; Karlen; Cambardella, 2004) e integração dos resultados em um índice global de qualidade do solo (SQI). Esse protocolo tem sido utilizado principalmente para avaliar indicadores de saúde do solo em sistemas agrícolas e, mais recentemente, em estudos relacionados à restauração de ecossistemas, especialmente com foco em indicadores físicos e químicos do solo (Bermeo *et al.*, 2022; Cherubin; Tormena; Karlen, 2017; De Vasconcelos *et al.*, 2023; Maróstica, 2023; Moreira *et al.*, 2023; Ruiz-Dager; Paolini, 2021; Tomás, 2022; Vezzani *et al.*, 2024). Entretanto, embora o SMAF represente uma ferramenta promissora para a avaliação integrada da saúde do solo, ainda são necessários avanços na interpretação de determinados indicadores (Becker, 2023), especialmente porque diferentes parâmetros refletem potenciais e limitações inerentes a cada tipo de solo (Bonetti *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de diferentes sistemas de restauração ecológica implantados há aproximadamente 27 anos sobre a saúde do solo em dois tipos de solo com propriedades edáficas naturalmente contrastantes. Especificamente, buscou-se: (i) avaliar os atributos físicos, químicos e biológicos do solo nos diferentes sistemas de restauração; (ii) integrar esses atributos por meio do Índice de Saúde do Solo (ISS), visando a uma avaliação mais abrangente da saúde do solo; (iii) avaliar as relações entre a vegetação, considerando atributos de estrutura, composição florística, composição funcional e biomassa, e os atributos do solo, incluindo o ISS; e (iv) comparar os sistemas de restauração com relação aos atributos do solo e ao ISS, considerando as áreas controle e as florestas de referência.

Para atender aos objetivos propostos, foram testadas as seguintes hipóteses: (i) sistemas de restauração com maior riqueza de espécies, área basal e biomassa vegetal possuem melhores condições dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, refletindo-se também em maiores valores do Índice de Saúde do Solo; (ii) a integração de atributos físicos, químicos e biológicos permite gerar índices de saúde do solo mais representativos do funcionamento dos ecossistemas restaurados do que abordagens baseadas em indicadores isolados; (iii) os sistemas de restauração apresentam melhores condições dos atributos do solo e maiores valores do ISS em relação ao tratamento controle, refletindo diferentes níveis de recuperação da saúde do solo.

6 CONCLUSÕES

Em síntese, após 27 anos de restauração ecológica, os sistemas de restauração ativa promoveram melhorias mensuráveis na saúde do solo em relação ao Controle, embora essas respostas tenham variado conforme o tipo de solo, o atributo avaliado e a profundidade considerada.

Na Área 1, Nitossolo Vermelho, as melhorias concentraram-se principalmente nos atributos químicos e no carbono orgânico das camadas superficiais, enquanto os atributos físicos apresentaram menor resposta aos sistemas de restauração. Esse resultado indica que a estabilidade estrutural e a fertilidade natural desse solo podem ter atenuado as diferenças entre sistemas.

Na Área 2, Argissolo Vermelho-Amarelo, os sistemas de restauração ativa apresentaram resposta mais evidente em relação ao Controle, especialmente no Índice de Saúde do Solo e em atributos das camadas superficiais. Nessa área, os sistemas restaurados alcançaram valores médios de ISS próximos aos da floresta de Referência, indicando recuperação funcional da saúde integrada do solo após 27 anos.

O Índice de Saúde do Solo mostrou-se uma ferramenta útil para integrar atributos físicos, químicos e biológicos, permitindo identificar padrões de recuperação que não seriam plenamente evidenciados pela análise isolada dos indicadores. As relações entre vegetação e solo também variaram entre os contextos pedológicos: no Nitossolo, foram observadas associações pontuais entre variáveis da vegetação e atributos edáficos, com apenas uma associação significativa com o ISS, enquanto no Argissolo foi observado maior número de associações entre variáveis da vegetação, atributos do solo e o ISS.

De modo geral, os resultados indicam que a recuperação da saúde do solo em áreas restauradas depende não apenas do tempo de implantação, mas também das características intrínsecas do solo, da profundidade avaliada e da composição funcional da vegetação. Assim, projetos de restauração ecológica devem considerar o contexto pedológico desde o planejamento, adotando estratégias ajustadas às limitações e ao potencial de recuperação de cada solo.

REFERÊNCIAS

- ALLEK, Adriana *et al.* How does forest restoration affect the recovery of soil quality? A global meta-analysis for tropical and temperate regions. **Restoration Ecology**, v. 31, n. 3, 23 mar. 2023.
- ANDREWS, Susan S.; KARLEN, Douglas L.; CAMBARDELLA, Cynthia A. The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1945–1962, 2004.
- ANGERS, Denis A.; CARON, Jean. Plant-induced Changes in Soil Structure: Processes and Feedbacks. **Biogeochemistry**, v. 42, n. 1/2, p. 55–72, 1998.
- APONTE, Cristina; GARCÍA, Luis V.; MARAÑÓN, Teodoro. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: A feedback mechanism favouring species coexistence. **Forest Ecology and Management**, v. 309, p. 36–46, dez. 2013.
- ARCANJO, F. A.; TOREZAN, J. M. D. Aboveground biomass accumulation and tree size distribution in seasonal Atlantic Forest restoration sites. **Restoration Ecology**, v. 31, n. 1, e13708, 2022.
- AUGUSTO, Laurent *et al.* Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. **Annals of Forest Science**, v. 59, n. 3, p. 233–253, abr. 2002.
- AYRES, Edward *et al.* Tree Species Traits Influence Soil Physical, Chemical, and Biological Properties in High Elevation Forests. **PLoS ONE**, v. 4, n. 6, p. e5964, 18 jun. 2009.
- BARBOSA, Eduardo A. A. *et al.* Soil attributes and quality under treated domestic sewage irrigation in sugarcane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 137–142, fev. 2018.
- BARDGETT, Richard D.; VAN DER PUTTEN, Wim H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, v. 515, n. 7528, p. 505–511, 26 nov. 2014.
- BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1–48, 2015.
- BAYER, Cimélio, *et al.* **Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2004, vol. 39, p. 677-683.
- BECKER, Regiane Kazmierczak. Uso do protocolo SMAF no estudo da saúde do solo em sistemas de uso e manejo no estado do Paraná. 2023.
- BEDOLLA-RIVERA, Héctor Iván *et al.* Analyzing the Impact of Intensive Agriculture on Soil Quality: A Systematic Review and Global Meta-Analysis of Quality Indexes. **Agronomy**, v. 13, n. 8, p. 2166, 18 ago. 2023.
- BERMEO, Juan Pablo Chavarro *et al.* Avaliando a qualidade do solo em sistemas silvipastoris pelo Soil Management Assessment Framework (SMAF) na Amazônia colombiana. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, p. e20217966, 2022.

BETTIOL, Wagner. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. 2023.

BHADURI, Debarati *et al.* A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, 17 ago. 2022.

BIZUTI, Denise T. G. *et al.* Multifunctional soil recovery during the restoration of Brazil's Atlantic Forest after bauxite mining. **Journal of Applied Ecology**, v. 59, n. 9, p. 2262–2273, 2022

BONETTI, João de Andrade *et al.* Agricultural practices to improve near-surface soil health and crop yield in subtropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 234, 1 out. 2023.

BONFANTE, Antonello; TERRIBILE, Fabio; BOUMA, Johan. Refining physical aspects of soil quality and soil health when exploring the effects of soil degradation and climate change on biomass production: an Italian case study. **SOIL**, v. 5, n. 1, p. 1–14, 10 jan. 2019.

BOMFIM, P. H.; REIS, C.; PODADERA, D. Biomassa em florestas restauradas: caminhos distintos ou resultados convergentes? In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MENSURAÇÃO FLORESTAL (MENSUFLO), 7., 2025, Lavras. *Anais [...]*. Lavras, 2025.

BOWLES, Timothy M. *et al.* Ecological intensification and arbuscular mycorrhizas: a meta-analysis of tillage and cover crop effects. **Journal of Applied Ecology**, v. 54, n. 6, p. 1785–1793, 3 dez. 2017.

BRANCALION, Pedro Henrique Santin *et al.* Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**, v. 2, p. 262–293, 2012.

BINKLEY, Dan; GIARDINA, Christian. Why do tree species affect soils? The Warp and Woof of tree–soil interactions. **Biogeochemistry**, v. 42, p. 89–106, 1998.

BULLINGER-WEBER, Géraldine *et al.* Influence of some physicochemical and biological parameters on soil structure formation in alluvial soils. **European Journal of Soil Biology**, v. 43, n. 1, p. 57–70, jan. 2007.

BÜNEMANN, Else K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, maio 2018.

CALDEIRA, Marcos Vinicius Winckler *et al.* Serapilheira e nutrientes acumulados sobre o solo em plantios de leguminosas e em área restaurada com espécies nativas da Floresta Atlântica. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 2, p. 961–971, 28 jun. 2020.

CARDINALE, Bradley J. *et al.* Biodiversity loss and its impact on humanity. **Nature**, v. 486, n. 7401, p. 59–67, 7 jun. 2012.

CELENTANO, Danielle *et al.* Litterfall dynamics under different tropical forest restoration strategies in Costa Rica. **Biotropica**, v. 43, n. 3, p. 279–287, maio 2011.

CHAER, Guilherme Montandon *et al.* Caracterização microbiológica do solo. In: PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C.; BONNET, A. (Ed.). Monitoramento da revegetação do COMPERJ: etapa inicial. **Embrapa**, 2014.

CHAVE *et al.* (2014): CHAVE, Jérôme *et al.* Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 2014.

CHERUBIN, Maurício Roberto; SCHIEBELBEIN, Bruna Emanuele. **Saúde do solo: múltiplas perspectivas e percepções**. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2022.

CHERUBIN, M. R. *et al.* A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, p. 215-226, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>.

DANE, J. H.; HOPMANS, Jan W. 3.3. 2 Laboratory. **Methods of soil analysis: Part 4 physical methods**, v. 5, p. 675–720, 2002.

DE MORAES SÁ, João Carlos *et al.* Soil-Specific Inventories of Landscape Carbon and Nitrogen Stocks under No-till and Native Vegetation to Estimate Carbon Offset in a Subtropical Ecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 6, p. 2094–2110, nov. 2013.

DE OLIVEIRA FERREIRA, Ademir *et al.* Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of The Total Environment**, v. 621, p. 1559–1567, abr. 2018.

DE OLIVEIRA, Daniele Costa *et al.* Changes in soil carbon and soil carbon sequestration potential under different types of pasture management in Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 22, n. 3, p. 87, 27 set. 2022.

DE VASCONCELOS, Tatiana Cabral *et al.* Atlantic Forest restoration recovers physical and biological properties in the short term, but not the general soil quality. **Land Degradation and Development**, v. 34, n. 6, p. 1842–1858, 15 abr. 2023.

DOMÍNGUEZ-HAYDAR, Yamileth *et al.* Evaluation of reclamation success in an open-pit coal mine using integrated soil physical, chemical and biological quality indicators. **Ecological Indicators**, v. 103, p. 182–193, ago. 2019.

DORAN, John W.; PARKIN, Timothy B. Defining and assessing soil quality. **Defining soil quality for a sustainable environment**, v. 35, p. 1–21, 1994.

EHLERINGER, James R.; SANDQUIST, Darren R. Ecophysiological constraints on plant responses in a restoration setting. **Foundations of restoration ecology**, v. 42, 2006.

ENGEL, Vera Lex; PARROTTA, John A. An evaluation of direct seeding for reforestation of degraded lands in central Sao Paulo state, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 152, n. 1–3, p. 169–181, 2001.

EVINER, Valerie T.; HAWKES, Christine V. Embracing variability in the application of plant-soil interactions to the restoration of communities and ecosystems. **Restoration Ecology**, v. 16, n. 4, p. 713–729, 2008.

FARIA, Vanêssa Lopes *et al.* Forest restoration enhances soil health in tropical agricultural landscapes assessed by soil management assessment framework (SMAF) across land uses and soil types. **Geoderma Regional**, v. 45, p. e01093, jun. 2026.

FELLER, C; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, v. 79, n. 1, p. 116–197, 1997.

FINEGAN Bryan *et al.* Does functional trait diversity predict above-ground biomass and productivity of tropical forests? Testing three alternative hypotheses. **Journal of Ecology**, v. 103, n. 1, p. 191–201, 2015.

FORRESTER, David I.; BAUHUS, Jürgen; COWIE, Annette L.; VANCLAY, Jerome K. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 2-3, p. 211–226, 2006.

GAO, Decai *et al.* Three-dimensional mapping of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil microbial biomass and their stoichiometry at the global scale. **Global Change Biology**, v. 28, n. 22, p. 6728–6740, 21 nov. 2022.

GODWIN EZEKIEL, Anietie *et al.* Influence of Trees Species on Nutrient Availability in the Forest Ecosystem. **Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry**, p. 37–44, 16 abr. 2022.

GOMES, J. B. V. *et al.* Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 137–153, fev. 2004.

GONÇALVES, Antonio Natal; MELLO, Sérgio Luis de Miranda. O sistema radicular das árvores. **Nutrição e fertilização florestal**, p. 427, 2015.

GRAVES, S.; PIEPHO, H.-P.; SELZER, L.; DORAI-RAJ, S. multcompView: visualizations of paired comparisons. R package version 0.1-11. 2026.

GUERRINI, Iraê Amaral *et al.* Evaluating carbon stocks in soils of fragmented Brazilian Atlantic Forests (BAF) based on soil features and different methodologies. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 10007, 1 maio 2024.

GUNINA, Anna *et al.* Response of soil microbial community to afforestation with pure and mixed species. **Plant and Soil**, v. 412, n. 1–2, p. 357–368, 10 mar. 2017.

GUO, Yanpei *et al.* The community-level scaling relationship between leaf nitrogen and phosphorus changes with plant growth, climate and nutrient limitation. **Journal of Ecology**, v. 108, n. 4, p. 1276–1286, 16 jul. 2020.

HANDA, I. Tanya *et al.* Consequences of biodiversity loss for litter decomposition across biomes. **Nature**, v. 509, n. 7499, p. 218–221, 8 maio 2014.

HARRELL JR., F. E. Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 5.2-5. 2026.

HECTOR, Andy. The importance of biodiverse plant communities for healthy soils. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 119, n. 1, 5 jan. 2022.

HOBIE, Sarah E. *et al.* Tree Species Effects on Soil Organic Matter Dynamics: The Role of Soil Cation Composition. **Ecosystems**, v. 10, n. 6, p. 999–1018, 20 set. 2007.

HOOGLMOED, M.; CUNNINGHAM, S. C.; BAKER, P. J.; BERINGER, J.; CAVAGNARO, T. R. Is there more soil carbon under nitrogen-fixing trees than under non-nitrogen-fixing trees in mixed-species restoration plantings? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 188, p. 80-84, 2014

HOTHORN, T.; BRETZ, F.; WESTFALL, P. Simultaneous inference in general parametric models. **Biometrical Journal**, v. 50, n. 3, p. 346-363, 2008.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n. 1)

JANZEN, H. Henry; JANZEN, David W.; GREGORICH, Edward G. The ‘soil health’ metaphor: Illuminating or illusory? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 159, p. 108167, ago. 2021.

KAGEYAMA, Paulo Yoshio *et al.* Restauração ecológica de ecossistemas naturais. In: **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. 2003. p. 340.

KARLEN, Douglas L. *et al.* Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104365, dez. 2019.

KARLEN, Douglas L. *et al.* Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4–10, 1997.

KLUTE, Arnold. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, Arnold (ed.). **Methods of soil analysis**: Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy / Soil Science Society of America, 1986. p. 635–662.

KUHN, M. Building predictive models in R using the caret package. **Journal of Statistical Software**, v. 28, n. 5, p. 1-26, 2008.

KUZNETSOVA, A.; BROCKHOFF, P. B.; CHRISTENSEN, R. H. B. lmerTest package: tests in linear mixed effects models. **Journal of Statistical Software**, v. 82, n. 13, p. 1-26, 2017.

LAOSSI, Kam Rigne *et al.* Effects of plant diversity on plant biomass production and soil macrofauna in Amazonian pastures. **Pedobiologia**, v. 51, n. 5–6, p. 397–407, 2008a.

LAOSSI, Kam-Rigne *et al.* Effects of plant diversity on plant biomass production and soil macrofauna in Amazonian pastures. **Pedobiologia**, v. 51, n. 5–6, p. 397–407, abr. 2008b.

LATAWIEC, Agnieszka E. *et al.* Natural regeneration and biodiversity: a global meta-analysis and implications for spatial planning. **Biotropica**, v. 48, n. 6, p. 844–855, 21 nov. 2016.

LEHMANN, Johannes *et al.* The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 10, p. 544–553, 25 ago. 2020.

LENTH, R. V.; PIASKOWSKI, J. emmeans: estimated marginal means, aka least-squares means. R package version 2.0.3. 2026.

LIU, Miao *et al.* The Response of Vegetation Biomass to Soil Properties along Degradation Gradients of Alpine Meadow at Zoige Plateau. **Chinese Geographical Science**, v. 30, n. 3, p. 446–455, 7 jun. 2020.

LOPES, Rafaela Dembiski; VEZZANI, Fabiane Machado; PARAGUAIO, Erick Vinicius. Abordagem da Qualidade do Solo nos trabalhos publicados no Brasil. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 11, n. 1, 2023.

MACHADO, Deivid L. *et al.* Site and plant community parameters drive the effect of vegetation on litterfall and nutrient inputs in restored tropical forests. **Plant and Soil**, v. 464, n. 1–2, p. 405–421, 26 jul. 2021.

MACHADO, Deivid Lopes. Aporte de serapilheira, fauna edáfica e matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de restauração florestal. 2016.

MARÓSTICA, Maria Emilia Moreira. **Saúde do solo e estoque de carbono em áreas com sistemas integrados de produção no Cerrado**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 8 ago. 2023.

MARQUES, Márcia C. M. *et al.* Forest structure and species composition along a successional gradient of Lowland Atlantic Forest in Southern Brazil. **Biota Neotropica**, 2014.

MARTINELLI, Luiz A.; LINS, Sílvia R. M.; DOS SANTOS-SILVA, Jéssica C. Fine litterfall in the Brazilian Atlantic Forest. **Biotropica**, v. 49, n. 4, p. 443–451, 23 jul. 2017.

MASSENSINI, André M. *et al.* Relative importance of soil physico-chemical characteristics and plant species identity to the determination of soil microbial community structure. **Applied Soil Ecology**, v. 91, p. 8–15, jul. 2015.

MEHLHOOP, Anne C.; EVJU, Marianne; HAGEN, Dagmar. Transplanting turfs to facilitate recovery in a low-alpine environment—What matters? **Applied Vegetation Science**, v. 21, n. 4, p. 615–625, 12 out. 2018.

MELI, Paula *et al.* A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. **PLOS ONE**, v. 12, n. 2, p. e0171368, 3 fev. 2017.

MENDES, Maiara S. *et al.* Look down—there is a gap—the need to include soil data in Atlantic Forest restoration. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 2, p. 361–370, 19 mar. 2019.

MITCHELL, Ruth J. *et al.* Is vegetation composition or soil chemistry the best predictor of the soil microbial community? **Plant and Soil**, v. 333, n. 1–2, p. 417–430, 14 ago. 2010.

MOREIRA, Silvino G. *et al.* Circular agriculture increases food production and can reduce N fertilizer use of commercial farms for tropical environments. **Science of The Total Environment**, v. 879, p. 163031, jun. 2023.

MORES, Guilherme José. Biomassa arbórea e carbono em áreas de restauração da Mata Atlântica. 2024.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, D. L. (ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 961-1010.

NOVAK, Elaine *et al.* Composição química do solo em diferentes condições ambientais. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 3, p. 1063–1085, 6 set. 2021.

NUNES, Marcio R. *et al.* How does tillage intensity affect chemical soil health indicators? A United States meta-analysis. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 3, n. 1, 17 jan. 2020.

OKSANEN, J. *et al.* vegan: Community Ecology Package. R package version 2.7-2. 2025.

PÁEZ-BIMOS, Sebastián *et al.* Vegetation effects on soil pore structure and hydraulic properties in volcanic ash soils of the high Andes. **Hydrological Processes**, v. 36, n. 9, 2 set. 2022.

PARRÉ, Fernando Martins. Impactos do tipo de manejo de plantas invasoras nos microrganismos do solo em plantio de restauração florestal. 2020.

PEÑA-BECERRIL, Juan Carlos *et al.* Uso del efecto de borde de la vegetación para la restauración ecológica del bosque tropical. **Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas**, v. 8, n. 2, p. 91–98, 2005.

PERRING, Michael P. *et al.* Advances in restoration ecology: Rising to the challenges of the coming decades. **Ecosphere**, v. 6, n. 8, 1 ago. 2015.

PONTES, Danila Morena Fidéles. Estoques de madeira, biomassa, carbono e avaliação econômica de diferentes sistemas de restauração ecológica para Reserva Legal. 2018.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Version 4.5.2. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

RAIESI, Fayez; SALEK-GILANI, Soroosh. Development of a soil quality index for characterizing effects of land-use changes on degradation and ecological restoration of rangeland soils in a semi-arid ecosystem. **Land Degradation & Development**, v. 31, n. 12, p. 1533–1544, 30 jul. 2020.

RAIJ, Bernardo van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAKKAR, Manbir K. *et al.* Impacts of Cattle Grazing of Corn Residues on Soil Properties after 16 Years. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 2, p. 414–424, 20 mar. 2017.

RASHID, Muhammad Imtiaz *et al.* Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. **Microbiological Research**, v. 183, p. 26–41, fev. 2016.

REY BENAYAS, José M. *et al.* Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis. **Science**, v. 325, n. 5944, p. 1121–1124, 2009.

RICHARDS, L. A. Physical condition of water in soil. In: BLACK, C. A. (ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Soil Tillage and Tillage Condition**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 128-152.

RINOT, Oshri *et al.* Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. **Science of The Total Environment**, v. 648, p. 1484–1491, jan. 2019.

RODRIGUES, Priscyla Maria Silva *et al.* The influence of soil on vegetation structure and plant diversity in different tropical savannic and forest habitats. **Journal of Plant Ecology**, p. rtw135, 26 dez. 2016.

ROELING, Ineke *et al.* N: P ratio explains plant species composition of grasslands independent from other environmental factors. 2016.

ROSCHER, Christiane *et al.* Using Plant Functional Traits to Explain Diversity–Productivity Relationships. **PLoS ONE**, v. 7, n. 5, p. e36760, 18 maio 2012.

RUIZ-DAGER, Magaly; PAOLINI, Jorge. Indicadores biológicos de suelos lacustres y aluviales de Venezuela bajo diferentes usos. Parte 1. Actividad microbiana y coeficientes ecofisiológicos. **Terra Latinoamericana**, v. 39, 2021.

SAHARAN, Krishna *et al.* Cropping Systems Effect on Soil Biological Health and Sustainability. In: **Microbial Interventions in Agriculture and Environment**. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 225–262.

SANTOS, Vilma Maria dos; MAIA, Leonor Costa. BIOINDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 10, n. 0, p. 195–226, 15 jun. 2015.

SCHERER-LORENZEN, Michael; BONILLA, José Luis; POTVIN, Catherine. Tree species richness affects litter production and decomposition rates in a tropical biodiversity experiment. **Oikos**, v. 116, n. 12, p. 2108–2124, dez. 2007.

SHAO, Pengshuai *et al.* Reforestation accelerates soil organic carbon accumulation: Evidence from microbial biomarkers. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 131, p. 182–190, abr. 2019.

SIDDIQUE, Ilyas *et al.* Dominance of legume trees alters nutrient relations in mixed species forest restoration plantings within seven years. **Biogeochemistry**, v. 88, n. 1, p. 89–101, 19 mar. 2008.

SILVA, Carlos Alberto *et al.* Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. **Entendendo a Matéria Orgânica do Solo em Ambientes Tropical e Subtropical**; Bettiol, W., Silva, CA, Cerri, CEP, Martin-Neto, L., Andrade, CAD, Eds, p. 17–47, 2023.

SILVA, Michelangelo de Oliveira *et al.* Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838–47855, 2020.

SIMON, Carla da Penha *et al.* Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 6 abr. 2022.

SINGAVARAPU, Bala *et al.* Functional Potential of Soil Microbial Communities and Their Subcommunities Varies with Tree Mycorrhizal Type and Tree Diversity. **Microbiology Spectrum**, v. 11, n. 2, 13 abr. 2023.

SOARES, Marcio Roberto; CASAGRANDE, José Carlos. O solo: base para a restauração ecológica. **Políticas Públicas para a Restauração Ecológica e Conservação da Biodiversidade**, p. 95, 2013.

SOUZA, Rodrigo Camara de *et al.* Nutrient cycling aspects as possible ecosystem functional indicators of successional stage in Semideciduous seasonal forest, Rio de Janeiro state, Brazil. **Acta Oecologica**, v. 121, p. 103951, nov. 2023.

SUN, Lijuan *et al.* Species of fast bulk-soil nutrient cycling have lower rhizosphere effects: A nutrient spectrum of rhizosphere effects. **Ecology**, v. 104, n. 4, 8 abr. 2023.

TADESSE KIFLE, Eguale. RETRACTED: Physico-chemical Characteristics of the Soils in Three Church Forest of Central Ethiopia. **Research in Ecology**, v. 2, n. 4, p. 1–8, 18 jan. 2022.

TAJIK, Samaneh *et al.* Effects of tree species composition on soil properties and invertebrates in a deciduous forest. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 11, p. 368, 31 jun. 2019.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análises de solo, plantas e outros materiais (Boletim Técnico, 5)**. UFRGS/Departamento de solos, ISBN 000-148837, Porto Alegre, Brasil, 1995.

TEEPE, Robert; DILLING, Hermann; BEESE, Friedrich. Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 166, n. 1, p. 111–119, 5 fev. 2003.

TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa Brasil, 2017.

TEJNECKÝ, Václav *et al.* The influence of land-use on tropical soil chemical characteristics with emphasis on aluminium. **Journal of Inorganic Biochemistry**, v. 204, p. 110962, mar. 2020.

TIVET, Florent *et al.* Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 126, p. 203–218, jan. 2013.

TOMÁS, Victória Dutra de Oliveira. Metodologias associadas à saúde do solo. 2022.

TOOR, Gurpal S., *et al.* Soil health in agricultural ecosystems: current status and future perspectives. **Advances in agronomy**, vol. 168, p. 157-201, 2021.

UROZ, S. *et al.* Specific impacts of beech and Norway spruce on the structure and diversity of the rhizosphere and soil microbial communities. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 27756, 15 jun. 2016.

VALLICROSA, Helena *et al.* Phosphorus scarcity contributes to nitrogen limitation in lowland tropical rainforests. **Ecology**, v. 104, n. 6, 24 jun. 2023.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VANBERGEN, Adam J. *et al.* Scale-specific correlations between habitat heterogeneity and soil fauna diversity along a landscape structure gradient. **Oecologia**, v. 153, n. 3, p. 713–725, set. 2007.

VELOSO, Murilo G.; CECAGNO, Diego; BAYER, Cimélio. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 139–146, jul. 2019.

VERA L. ENGEL, John A. Parrotta. Definindo a restauração ecológica: tendências e perspectivas mundiais. *In: Restauração ecológica de ecossistemas naturais*. FEPAF ed. Botucatu (SP) - Brasil: 2003. p. 1–26.

VEZZANI, Fabiane Machado, *et al.* Soil Health and Modern Brazilian Agriculture. **Soil Health Series: Volume 3 Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil**, 2024, p. 1-18.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934.

WANG, Faming *et al.* Seedling growth and soil nutrient availability in exotic and native tree species: implications for afforestation in southern China. **Plant and Soil**, v. 364, n. 1–2, p. 207–218, 13 mar. 2013.

WARDLE, David A. *et al.* The influence of plant litter diversity on decomposer abundance and diversity. **Soil biology and Biochemistry**, v. 38, n. 5, p. 1052–1062, 2006.

WEI, T.; SIMKO, V. R package corrplot: visualization of a correlation matrix. Version 0.95. 2024.

WIECHETECK, Lucia Helena. Biocarvão e calcário como condicionadores de solos cultivados. 2021.

WIENHOLD, B. J. *et al.* Protocol for indicator scoring in the soil management assessment framework (SMAF). **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 24, n. 4, p. 260–266, 18 dez. 2009.

WILLIAMS, Hanna; COLOMBI, Tino; KELLER, Thomas. The influence of soil management on soil health: An on-farm study in southern Sweden. **Geoderma**, v. 360, p. 114010, fev. 2020.

WRIGHT, S. Joseph *et al.* Potassium, phosphorus, or nitrogen limit root allocation, tree growth, or litter production in a lowland tropical forest. **Ecology**, v. 92, n. 8, p. 1616–1625, ago. 2011.

XIAO, Tao *et al.* Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review. **Science of The Total Environment**, v. 906, p. 167524, jan. 2024.

XIONG, Yanmei *et al.* Low Nitrogen Retention in Soil and Litter under Conditions without Plants in a Subtropical Pine Plantation. **Forests**, v. 6, n. 7, p. 2387–2404, 15 jul. 2015.

YUAN, Yong *et al.* Spatial variation of soil physical properties and its relationship with plant biomass in degraded slopes in dry-hot valley region of Southwest China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, n. 5, p. 2354–2366, 17 maio 2020.

ZANNE, A. E.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; COOMES, D. A.; ILIC, J.; JANSEN, S.; LEWIS, S. L.; MILLER, R. B.; SWENSON, N. G.; WIEMANN, M. C.; CHAVE, J. **Global wood density database**. Dryad, 2009.

ZHAO, Shuwen *et al.* Soil bacterial community responses to cadmium and lead stabilization during ecological restoration of an abandoned mine. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 3, p. 1459–1469, 4 jul. 2022.

ZHU, Bingbing *et al.* Soil erodibility, microbial biomass, and physical–chemical property changes during long-term natural vegetation restoration: a case study in the Loess Plateau, China. **Ecological Research**, v. 25, n. 3, p. 531–541, 6 maio 2010.