

INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS CERES
BACHARELADO EM AGRONOMIA
RAMON RINCON JÚNIOR

USO DE LEGUMINOSAS NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS
NO CERRADO: UMA REVISÃO

CERES – GO
2025

RAMON RINCON JÚNIOR

**USO DE LEGUMINOSAS NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS
NO CERRADO: UMA REVISÃO**

Trabalho de curso apresentado ao curso de Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia, sob orientação da Professora. Dra. Flávia Abrão Pessoa e coorientadora Professora. Dra. Alexsandra Valeria Sousa Costa de Lima.

CERES – GO

2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

R579u Rincon Júnior, Ramon
 Uso de leguminosas na recuperação de áreas degradadas no
 cerrado: uma revisão / Ramon Rincon Júnior. Ceres 2025.

 37f. il.

 Orientadora: Profª. Dra. Flávia Oliveira Abrão Pessoa.
 Coorientadora: Profª. Dra. Alexsandra Valeria Sousa Costa de
 Lima.
 Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0320024 -
 Bacharelado em Agronomia - Ceres (Campus Ceres).
 1. Degradação do solo. 2. Fixação biológica de nitrogênio. 3.
 Leguminosas. 4. Recuperação ambiental. 5. Sustentabilidade. I.
 Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Ramon Rincon Júnior

Matrícula: 2016103200210193

Título do Trabalho: **USO DE LEGUMINOSAS NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS NO CERRADO: UMA REVISÃO**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 12/12/2025

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☒ Sim ☐ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

gov.br
Documento assinado digitalmente
RAMON RINCON JUNIOR
Data: 06/12/2025 11:52:20-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Ceres _____, 06/12/2025 Local _____ Data _____

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

gov.br
Documento assinado digitalmente
FLAVIA OLIVEIRA ABRÃO PESSOA
Data: 09/12/2025 10:07:24-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Assinatura do(a) orientador(a)

ANEXO IV - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) PRIMEIRO dia(s) do mês de DEZEMBRO do ano de dois mil e VINTE E CINCO, realizou-se a defesa de Trabalho de Curso do(a) acadêmico(a) RAMON RINCON JÚNIOR, do Curso de BACHARELADO EM AGRONOMIA, matrícula 2016103200210193, cujo título é "USO DE LEGUMINOSAS NA RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADAS NO CERRADO: UMA REVISÃO". A defesa iniciou-se às

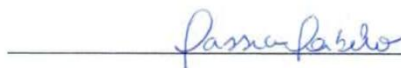
13 horas e 07 minutos, finalizando-se às 13 horas e 32 minutos. A banca examinadora considerou o trabalho APROVADO com média 7,17 no trabalho escrito, média 8,17 no trabalho oral, apresentando assim média aritmética final 7,67 de pontos, estando o(a) estudante APTO para fins de conclusão do Trabalho de Curso.

Após atender às considerações da banca e respeitando o prazo disposto em calendário acadêmico, o(a) estudante deverá fazer a submissão da versão corrigida em formato digital (.pdf) no Repositório Institucional do IF Goiano – RIIF, acompanhado do Termo Ciência e Autorização Eletrônico (TCAE), devidamente assinado pelo autor e orientador.

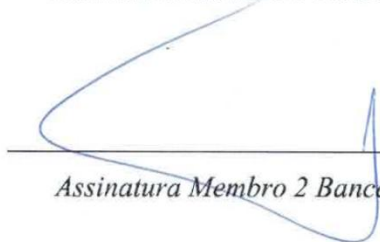
Os integrantes da banca examinadora assinam a presente.



Assinatura Presidente da Banca



Assinatura Membro 1 Banca Examinadora



Assinatura Membro 2 Banca Examinadora

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta caminhada.

À professora e orientadora, Dra. Flávia Abrão Pessoa, cujo incentivo e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, que me motivou de forma constante e esteve ao meu lado em todos os momentos, fortalecendo-me para a conclusão desta etapa.

*“A dor faz você mais forte, o medo
faz você mais corajoso e a
paciência faz você mais sábio.”.*

Desconhecido

RESUMO

A degradação de solos agrícolas e naturais tem se intensificado, exigindo estratégias de recuperação ambiental mais eficientes. Este trabalho teve como objetivo revisar a literatura científica sobre o uso de leguminosas na recuperação de áreas degradadas, abrangendo seus mecanismos de ação, benefícios e limitações registradas na literatura recente. Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, com busca nas bases SciELO, Google Scholar e biblioteca digital da Embrapa, priorizando publicações entre 2020 e 2025 e utilizando descritores em português e inglês relacionados a leguminosas, fixação biológica de nitrogênio, adubação verde e recuperação do solo. Os estudos selecionados foram analisados de forma crítica e comparativa, considerando a aplicabilidade das leguminosas em diferentes contextos de degradação. Os resultados indicam que essas espécies promovem melhoria química, física e biológica do solo, sobretudo pela fixação biológica de nitrogênio, aumento da matéria orgânica, maior estabilidade de agregados e estímulo à biomassa microbiana. Espécies como *Crotalaria juncea*, *Mucuna pruriens*, *Vigna unguiculata*, *Stylosanthes spp.*, *Cajanus cajan* e *Lupinus albus* se destacam pela elevada produção de biomassa, adaptação a condições adversas e, em alguns casos, potencial fitorremediador. Sistemas consorciados com gramíneas e o uso de compostos orgânicos derivados de leguminosas ampliam os ganhos de produtividade e eficiência no uso de nutrientes. Conclui-se que o uso planejado de leguminosas constitui alternativa técnica e economicamente viável para restaurar a funcionalidade de áreas degradadas e apoiar sistemas de produção mais sustentáveis.

Palavras-chave: Degradação do solo. Fixação biológica de nitrogênio. Leguminosas. Recuperação ambiental. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Soil degradation in agricultural and natural environments has intensified, demanding more efficient environmental restoration strategies. This study aimed to review the scientific literature on the use of legumes in the recovery of degraded areas, addressing their mechanisms of action, documented benefits, and limitations reported in recent studies. This is a narrative literature review, based on searches in SciELO, Google Scholar, and the Embrapa digital library, prioritizing publications from 2020 to 2025 and using descriptors in Portuguese and English related to legumes, biological nitrogen fixation, green manure, and soil restoration. The selected studies were analyzed critically and comparatively, considering the applicability of legumes in different degradation contexts. The results indicate that these species promote chemical, physical, and biological improvements in the soil, especially through biological nitrogen fixation, increased organic matter, greater aggregate stability, and stimulation of microbial biomass. Species such as *Crotalaria juncea*, *Mucuna pruriens*, *Vigna unguiculata*, *Stylosanthes* spp., *Cajanus cajan*, and *Lupinus albus* stand out for their high biomass production, adaptability to adverse conditions, and, in some cases, phytoremediation potential. Consortia with grasses and the use of organic compounds derived from legumes further enhance productivity gains and nutrient-use efficiency. It is concluded that the planned use of legumes represents a technically and economically viable alternative for restoring the functionality of degraded areas and supporting more sustainable production systems.

Keywords: Soil degradation. Biological nitrogen fixation. Legumes. Environmental restoration. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparativo entre solo saudável e solo degradado, evidenciando diferenças estruturais, biológicas e na capacidade de infiltração de água.....	4
Figura 2 – Representação esquemática do ciclo do nitrogênio no solo e o papel das leguminosas na fixação biológica.	8
Figura 3 – Etapa das da metodologia adotada neste estudo.	11
Figura 4 - Parcela de <i>Crotalaria juncea</i> em desenvolvimento vegetativo, destacando seu porte elevado e potencial para produção de biomassa.	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de estudos selecionados.....	10
Tabela 2 – Indicadores de melhoria físico-química e biológica do solo após o uso de leguminosas em áreas degradadas.	19
Tabela 3 - Valores de fixação biológica de nitrogênio (FBN) reportados na literatura.....	21

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre espécies de leguminosas utilizadas na recuperação de áreas degradadas	16
--	-----------

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Áreas degradadas: definições e características	3
2.2 Causas da degradação ambiental.....	5
2.3 Leguminosas e suas características	7
3 METODOLOGIA	10
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	24
REFERÊNCIAS.....	25

1 INTRODUÇÃO

A degradação ambiental é um fenômeno complexo e multifatorial, intensificado nas últimas décadas devido à expansão das atividades humanas e ao uso insustentável dos recursos naturais. Processos como desmatamento, queimadas, mineração, agricultura intensiva e pecuária extensiva têm favorecido a perda da cobertura vegetal, o empobrecimento da biodiversidade e o aumento da erosão dos solos, como descrevem Silva et al. (2018).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2020), estima-se que aproximadamente 33% dos solos do planeta apresentem algum nível de degradação, o que compromete a produtividade agrícola e os serviços ecossistêmicos. No Brasil, Carneiro et al. (2019) apontam que mais de 100 milhões de hectares registram diferentes graus de degradação, especialmente em áreas de forte pressão agropecuária.

Os impactos decorrentes da degradação do solo vão além da redução da produtividade. A perda de matéria orgânica, a compactação e o desequilíbrio biológico alteram o ciclo de nutrientes e reduzem a infiltração de água, o que prejudica a estabilidade da vegetação e aumenta a suscetibilidade a processos erosivos e assoreamento, conforme destacado por Moreira e Siqueira (2018).

A recuperação dessas áreas tem se tornado uma demanda recorrente, pois permite restabelecer a funcionalidade ecológica e promover o uso sustentável do solo. Como observam Santos et al. (2020), práticas conservacionistas associadas à revegetação com espécies nativas ou adaptadas surgem como estratégias que reúnem benefícios ambientais, econômicos e sociais.

Entre as práticas disponíveis, destaca-se o emprego de leguminosas na recuperação de áreas degradadas. Espécies da família Fabaceae apresentam características morfofisiológicas e ecológicas que favorecem esse processo, como produção de biomassa, formação de cobertura vegetal densa e capacidade de fixação biológica de nitrogênio (Hungria et al., 2016; Martins et al., 2021).

Conforme Hungria et al. (2016) e Moreira e Siqueira (2018), a fixação biológica de nitrogênio contribui para o enriquecimento do solo, reduz a dependência de fertilizantes minerais e melhora as condições para o estabelecimento de outras plantas. Essa capacidade está associada à simbiose entre leguminosas e

microrganismos dos gêneros *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* e *Azorhizobium*, que convertem o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis, como o amônio.

O crescimento radicular dessas espécies também atua na reabilitação física do solo, pois contribui para a descompactação e favorece a infiltração de água. A cobertura vegetal diminui a erosão e o escoamento superficial, enquanto a decomposição de folhas e raízes aumenta o teor de matéria orgânica e estimula a atividade microbiana, como observado por Santos et al. (2020) e Carvalho et al. (2021).

Diversas leguminosas vêm sendo utilizadas com bons resultados em ações de restauração. *Crotalaria juncea* é reconhecida pela alta produção de biomassa e rápido crescimento. *Mucuna pruriens* apresenta bom desempenho na fixação de nitrogênio e no controle de plantas invasoras. Já espécies de *Stylosanthes* spp. e *Inga edulis* são valorizadas pela adaptabilidade e pelo papel na melhoria da fertilidade em sistemas agroflorestais, conforme Martins et al. (2021) e Lima et al. (2022).

Essas espécies também influenciam a dinâmica dos nutrientes no solo, aumentando o teor de nitrogênio total, a capacidade de troca catiônica e a estabilidade dos agregados, o que favorece uma recuperação mais eficiente, conforme demonstrado por Souza et al. (2021). O uso em consórcios com gramíneas ou plantas arbóreas tende a acelerar a sucessão ecológica e fortalecer a restauração, como destacado por Carneiro et al. (2019).

O emprego de leguminosas está alinhado com políticas públicas e iniciativas de recuperação ambiental, como o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) (Brasil, 2017), o Plano ABC+ e o Plano Nacional de Conversão de Áreas Degradadas. A articulação entre resultados científicos e diretrizes institucionais reforça a necessidade de práticas que reduzam o impacto antrópico e melhorem a qualidade dos solos.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo revisar a literatura científica sobre o uso de leguminosas na recuperação de áreas degradadas, abrangendo seus mecanismos de ação, benefícios e limitações registradas na literatura recente. A intenção é ampliar o entendimento sobre o potencial dessas espécies e oferecer subsídios que apoiem práticas de manejo e estratégias de restauração ambiental.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Áreas degradadas: definições e características

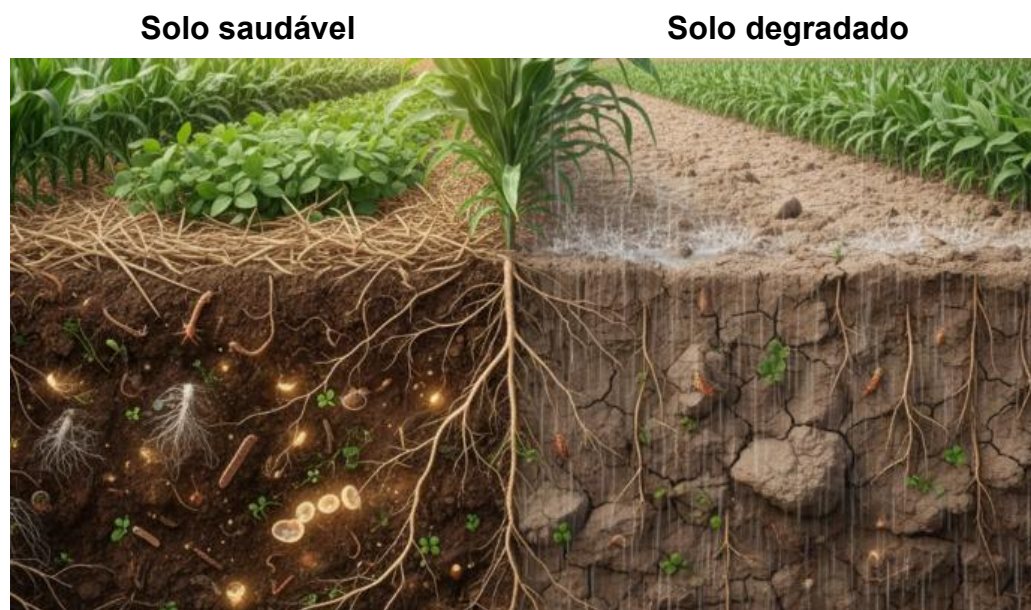
Áreas degradadas são ambientes que passaram por alterações negativas decorrentes de fatores naturais ou antrópicos, o que compromete sua estrutura, funcionamento e capacidade de sustentar processos ecológicos básicos. De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, a degradação do solo envolve redução da produtividade, perda de biodiversidade e diminuição dos serviços ecossistêmicos que mantêm a estabilidade ambiental (FAO, 2019). Esses impactos representam um desafio recorrente em regiões onde a pressão sobre os recursos naturais intensificou-se, especialmente em cenários de uso inadequado do solo.

A degradação pode ocorrer por erosão, compactação, salinização, contaminação química e perda de matéria orgânica, processos que reduzem a resiliência dos ecossistemas. Essas alterações afetam a regeneração natural, diminuem a disponibilidade de nutrientes e prejudicam atividades agrícolas, hídricas e ecológicas, conforme discutido por Lal (2001). A combinação desses fatores compromete a sustentabilidade ambiental e reforça a necessidade de práticas de manejo adequadas para restaurar o equilíbrio do solo.

As áreas degradadas apresentam padrões variados de acordo com a intensidade e o tipo de impacto. A baixa fertilidade é uma característica frequente e resulta da lixiviação de nutrientes, da erosão e da exploração agrícola contínua, o que limita o crescimento das plantas e enfraquece a dinâmica biológica do solo, como apontado por Sposito (2008). A perda de estrutura física também é recorrente, manifestada por compactação e fragmentação dos agregados do solo, dificultando a penetração das raízes e reduzindo a infiltração de água, conforme observado por Bronick e Lal (2005).

A perda de matéria orgânica, a compactação e a redução da atividade biológica são fatores que distinguem solos preservados de áreas severamente degradadas (Ojeda et al., 2025). Esse contraste pode ser observado na Figura 1, que ilustra diferenças estruturais, biológicas e hídricas entre um solo saudável e um solo deteriorado.

Figura 1 – Comparativo entre solo saudável e solo degradado, evidenciando diferenças estruturais, biológicas e na capacidade de infiltração de água.



Fonte: Oliveira (2025).

A comparação entre as duas partes da Figura 1 evidencia diferenças fundamentais entre um solo saudável e um solo degradado. No solo saudável, observa-se maior presença de matéria orgânica, agregados bem formados, atividade biológica intensa e raízes distribuídas em profundidade, o que favorece a infiltração de água e o desenvolvimento das plantas. Já o solo degradado apresenta compactação, menor diversidade biológica, baixa porosidade e estrutura fragilizada, além de fissuras que indicam a perda de umidade e a redução da capacidade de retenção de água. Esses contrastes refletem a perda de funcionalidade ecológica que caracteriza ambientes degradados e reforçam a importância de práticas de manejo e recuperação voltadas à restauração da qualidade do solo (Silva et al., 2022).

A redução da biodiversidade constitui outro aspecto relevante das áreas degradadas. A remoção da vegetação e o empobrecimento do solo afetam diretamente as comunidades de fauna e flora, o que limita processos de sucessão ecológica e dificulta a restauração do ambiente, segundo o Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005). Em muitos casos, a degradação avança para cenários de erosão severa, em que a perda das camadas superficiais férteis do solo acelera processos de desertificação, como discutido por Pimentel e Burgess (2013).

A contaminação por substâncias tóxicas, especialmente em regiões industriais, mineradoras ou com uso excessivo de agroquímicos, também configura uma forma relevante de degradação. A presença de metais pesados e compostos persistentes altera o equilíbrio biogeoquímico do solo e dificulta sua recuperação, um ponto destacado por Schnoor (1996). Além disso, alterações no ciclo hidrológico, provocadas pela compactação e pela perda de matéria orgânica, reduzem a capacidade de retenção de água e aumentam o risco de enchentes ou ressecamento do solo, como relatado pela FAO (2021). Esses efeitos ampliam os desafios de manejo e evidenciam a necessidade de estratégias de recuperação que considerem tanto os aspectos físicos quanto biológicos do ambiente.

2.2 Causas da degradação ambiental

A degradação ambiental está diretamente relacionada à ausência de manejo adequado e ao uso intensivo dos recursos naturais, fatores que afetam negativamente a cadeia agropecuária e ampliam a emissão de gases de efeito estufa. Nascimento et al. (2025) destacam que práticas inadequadas de uso do solo comprometem a produtividade, a capacidade de regeneração e o equilíbrio ecológico das paisagens rurais. O solo, enquanto recurso vital para atividades humanas, é pressionado por múltiplas formas de exploração, desde o crescimento urbano até a intensificação agropecuária, como ressaltado por Coelho et al. (2019).

No Brasil, a diversidade climática e geográfica, somada à intensidade das atividades antrópicas, torna o país mais suscetível a processos erosivos e demais formas de degradação. Sayem (2021) aponta que a heterogeneidade ambiental, quando associada a práticas inadequadas de manejo, favorece a perda de solo, a compactação e a diminuição da fertilidade. Esses efeitos refletem o desafio de conciliar desenvolvimento socioeconômico com conservação ambiental.

A preocupação com a restauração de áreas degradadas possui registros históricos, e diferentes civilizações já realizavam práticas de recuperação. Contudo, Rodrigues e Gandolfi (2004) observam que, durante muitos séculos, tais ações careciam de fundamentos ecológicos sólidos, sendo limitadas ao simples plantio de mudas. Mais recentemente, estudos como os de Dijoo e Khurshid (2022)

demonstram que a degradação tornou-se mais complexa devido ao avanço tecnológico, urbanização acelerada e intensificação dos sistemas produtivos.

O uso repetitivo do solo sem práticas conservacionistas e sem reposição adequada de nutrientes leva ao esgotamento da fertilidade e compromete a estrutura física do ambiente. Ali e Rahman (2024) destacam que monoculturas extensivas, manejo inadequado de pastagens e aplicação incorreta de insumos contribuem para a compactação, erosão e perda de matéria orgânica. Tais fatores reduzem a capacidade de infiltração de água e tornam o solo improdutivo.

A classificação das áreas naturais, discutida por Pequeno et al. (2002), auxilia na compreensão da gravidade da degradação. Áreas primárias apresentam maior resiliência após perturbações leves, enquanto áreas perturbadas mostram alterações moderadas, mas ainda recuperáveis. Já áreas degradadas possuem perda substancial da capacidade de regeneração, exigindo intervenções técnicas mais profundas. Essa distinção é fundamental para orientar práticas de recuperação ambiental.

A recuperação de ambientes degradados exige estratégias de reestruturação física, química e biológica do solo. Nascimento et al. (2025) reforçam que a reintrodução de plantas adaptadas, como leguminosas, contribui para o aumento da matéria orgânica, a melhoria da estrutura e o estímulo à atividade biológica. Esse processo está diretamente relacionado à funcionalidade ecológica e ao restabelecimento dos serviços ambientais.

As causas da degradação ambiental apresentam múltiplas dimensões e podem ser agrupadas em fatores naturais e antrópicos. Entre os fatores naturais, destacam-se os processos erosivos desencadeados pelo vento e pela água, que removem as camadas mais férteis do solo. Yeganeh (2020) observou que eventos climáticos extremos, como secas prolongadas ou tempestades intensas, intensificam a perda de nutrientes e reduzem a estabilidade ecológica. Esses fenômenos são agravados em áreas áridas e semiáridas, favorecendo a desertificação.

Entre os fatores antrópicos, o desmatamento exerce grande influência ao expor o solo aos agentes erosivos e reduzir a biodiversidade. Coelho et al. (2019) e Sayem (2021) destacam que a remoção da vegetação compromete o ciclo hidrológico e aumenta a sedimentação em corpos d'água. O uso inadequado do solo também representa importante vetor de degradação. Sistemas agrícolas intensivos e

monoculturas, quando conduzidos sem rotação de culturas ou práticas de conservação, aceleram o esgotamento dos nutrientes e promovem a compactação do solo.

Atividades industriais e mineradoras configuram outra importante causa de degradação ambiental. Dijoo e Khurshid (2022) apontam que o descarte inadequado de resíduos, a contaminação por metais pesados e o comprometimento dos corpos hídricos reduzem drasticamente o potencial de regeneração. Queimadas recorrentes, naturais ou provocadas, também contribuem para a redução da matéria orgânica e para a alteração da microbiota do solo, dificultando a recuperação, como reforçado por Ali e Rahman (2024).

A urbanização e a expansão agrícola sem planejamento intensificam esses processos. Yeganeh (2020) argumentou que a conversão de áreas naturais para usos urbanos e agrícolas resulta na compactação, impermeabilização e contaminação do solo, além da perda de habitats e fragmentação de ecossistemas. Esses fatores, quando combinados, ampliam a complexidade da degradação e reforçam a necessidade de estratégias integradas para mitigação e restauração.

2.3 Leguminosas e suas características

As leguminosas formam um grupo diversificado de plantas reconhecido pela capacidade de estabelecer associações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio. Espécies dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* convertem o nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis, contribuindo para o enriquecimento do solo e a melhoria das condições para o estabelecimento de outras plantas (Hungria et al., 2001). Esse processo tem papel central em áreas degradadas, onde a disponibilidade de nutrientes costuma ser limitada.

As leguminosas exercem influência positiva sobre o acúmulo de biomassa e a qualidade do solo. Trabalhos recentes demonstram que o aumento da serapilheira e dos nutrientes provenientes da decomposição de resíduos favorece a formação de agregados estáveis e melhora o conteúdo de matéria orgânica (Caldeira et al., 2020). Esses efeitos resultam em melhor infiltração de água e menor suscetibilidade à erosão, características essenciais para ambientes em recuperação.

Dessa forma, a Figura 2 ilustra o ciclo do nitrogênio no solo, destacando as etapas de transformação desse elemento e o papel das leguminosas na fixação biológica. A representação evidencia como o nitrogênio atmosférico é convertido em formas assimiláveis, a interação entre microrganismos e raízes, além dos processos de nitrificação e desnitrificação que mantêm a dinâmica do solo.

Figura 2 – Representação esquemática do ciclo do nitrogênio no solo e o papel das leguminosas na fixação biológica.



Fonte: Santos, Velho e Freitas (2021).

Observando a Figura 2, destaca-se que as transformações químicas e biológicas que permitem sua incorporação pelas plantas. O processo começa com a fixação do nitrogênio atmosférico (N_2) por bactérias associadas às leguminosas, que convertem esse gás em amônio (NH_4^+), forma assimilável. Parte do nitrogênio passa por nitrificação, originando nitrito (NO_2^-) e, posteriormente, nitrato (NO_3^-), que pode ser absorvido pelas plantas ou perdido por lixiviação. Resíduos vegetais e animais retornam ao solo e são decompostos, reintegrando o ciclo. Em condições anaeróbicas, bactérias desnitrificantes convertem nitratos novamente em N_2 ou N_2O , fechando o ciclo e evidenciando a complexidade das interações entre solo, plantas e microrganismos.

Estudos desenvolvidos em pastagens e sistemas agrícolas brasileiros mostram que o uso de leguminosas pode acelerar a recomposição da fertilidade do solo. Terra et al. (2019) apontam que espécies forrageiras desempenham papel relevante na restauração de pastagens degradadas, aumentando a cobertura

vegetal e reforçando a ciclagem de nutrientes. Em solos arenosos ou compactados, espécies como *Mucuna pruriens* e *Vigna unguiculata* apresentam bom desempenho ao elevar os teores de matéria orgânica e melhorar a estrutura física, conforme demonstrado por Lima e Costa (2021).

A diversidade funcional das leguminosas amplia seu potencial em projetos de recuperação, permitindo selecionar espécies adaptadas a diferentes climas e condições edáficas. Souza e Almeida (2020) destacam que essa variabilidade facilita o uso do grupo em biomas distintos, inclusive em áreas com degradação severa. Em solos contaminados, *Crotalaria juncea* tem sido utilizada de forma eficaz na fitorremediação, absorvendo e imobilizando compostos tóxicos e contribuindo para a restauração química do ambiente (Nascimento et al., 2022).

As leguminosas também influenciam diretamente a biologia do solo. Martins et al. (2023) observaram aumentos expressivos na biomassa microbiana após a introdução dessas espécies, promovendo um ambiente mais favorável à sucessão vegetal. Em estudos envolvendo resíduos industriais e áreas mineradas, a combinação de leguminosas com compostos orgânicos mostrou potencial para acelerar a recuperação da fertilidade e reduzir a toxicidade do solo, reforçando seu papel multifuncional (Zago et al., 2023).

Pereira e Rodrigues (2021) complementam que a associação de leguminosas com fungos micorrízicos arbusculares intensifica a absorção de nutrientes e melhora a tolerância das plantas a condições de estresse. Esses processos reforçam a importância do uso planejado de leguminosas em estratégias de recuperação ambiental, evidenciando que seus benefícios vão além do aporte de nitrogênio, envolvendo também melhorias estruturais, biológicas e químicas nos solos degradados.

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi estruturado como uma revisão narrativa da literatura, delineamento escolhido por permitir análise crítica e comparativa de estudos sobre a utilização de leguminosas na recuperação de solos degradados. O caráter narrativo oferece flexibilidade para integrar resultados, confrontar conceitos e discutir a aplicabilidade das técnicas sob uma perspectiva edáfico-ambiental, mantendo rigor científico sem necessidade de tratamento estatístico.

A Tabela 1 apresenta a distribuição temporal desses materiais, permitindo visualizar o equilíbrio entre referências históricas e contribuições contemporâneas que fortalecem a atualidade e a robustez do presente estudo.

Tabela 1 - Relação de estudos selecionados.

Período	Contagem
Antigos (1980 – 2009)	10
Intermediários (2010 – 2019)	14
Recentes (2020 – 2025)	43
Total	67

Fonte: Autores, 2025.

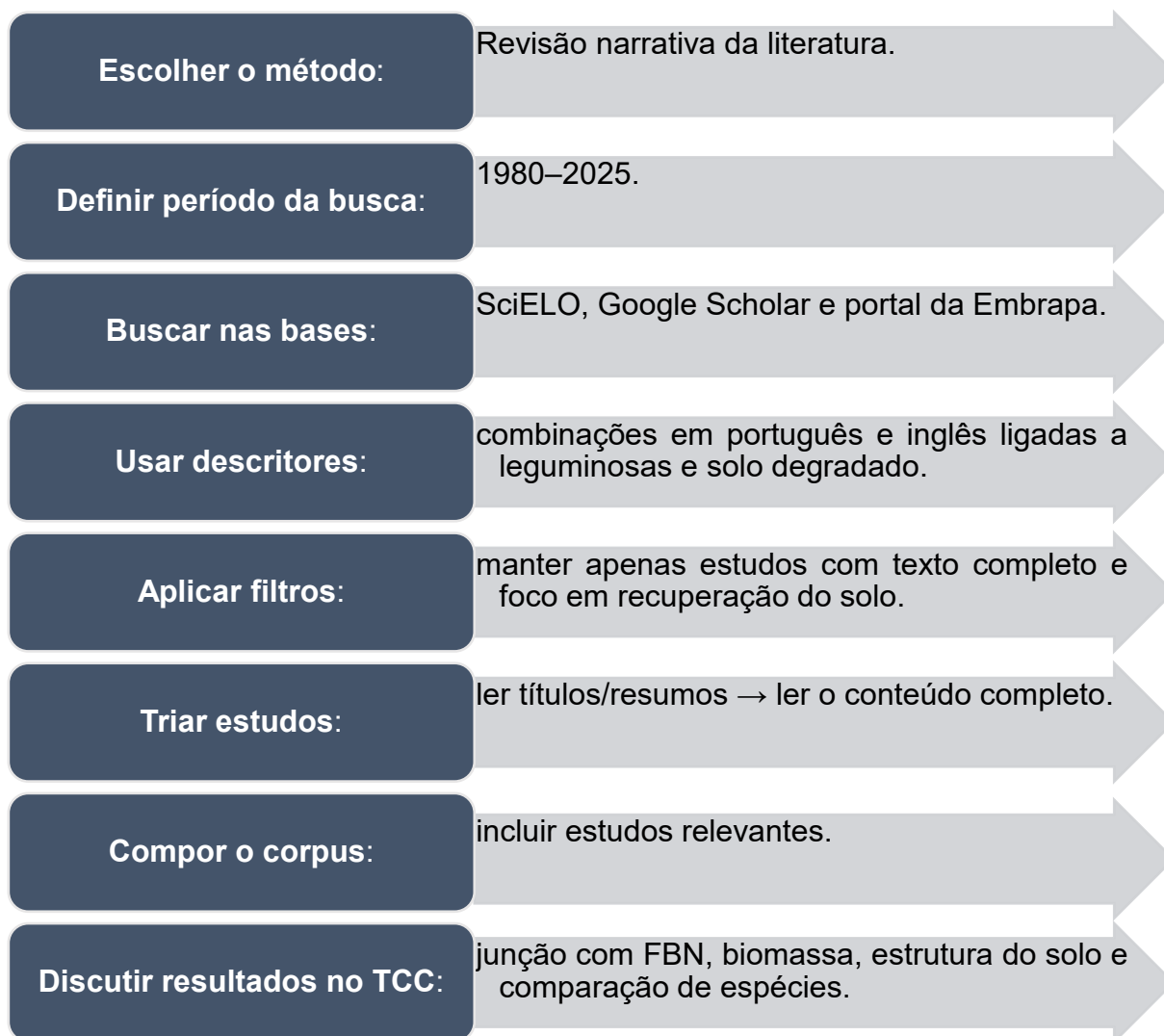
A busca documental ocorreu em três bases de dados principais: SciELO, Google Scholar e na biblioteca digital da Embrapa. Foram consideradas publicações no período de 2020 a 2025, garantindo a atualidade das evidências, além do uso criterioso de obras anteriores (1980 a 2019) apenas quando indispensáveis para sustentação teórica clássica do tema.

Os descritores foram definidos em português e inglês, combinados por operadores booleanos. Em português: “leguminosas AND áreas degradadas”, “fixação biológica de nitrogênio OR FBN”, “adubação verde AND recuperação do solo”. Em inglês: “legumes AND degraded lands”, “biological nitrogen fixation AND soil restoration”, “green manure AND environmental recovery”.

A seleção dos estudos seguiu critérios de inclusão: materiais com acesso integral disponível e que abordassem diretamente solos degradados e o uso de espécies da família Fabaceae como estratégia de restauração. Foram excluídos documentos sem texto completo, duplicados ou que não tratassem da recuperação do solo como objetivo central.

A Figura 3 apresenta, de forma sequencial, as etapas metodológicas adotadas neste estudo.

Figura 3 – Etapa da metodologia adotada neste estudo.



Fonte: Autores, 2025.

A triagem foi dividida em duas etapas: leitura inicial de títulos e resumos para análise da aderência temática, e leitura integral para confirmação da relevância teórica e prática. O protocolo de busca e seleção também levou em conta a confiabilidade das instituições, priorizando artigos revisados por pares, capítulos técnicos da Embrapa, e diretrizes de conservação de solo amplamente difundidas em ambientes acadêmicos e de pesquisa agroambiental no Brasil.

Também foram incluídos estudos que abordam a ressemeadura mista em pastagens degradadas, com destaque para resultados que mostram superioridade de consórcios leguminosos-gramíneas quando comparados a abordagens

monoespecíficas, reforçando a importância da sinergia vegetal na restauração do solo.

As análises conceituais e práticas foram construídas de modo descritivo comparativo, confrontando resultados divergentes ou convergentes entre autores, buscando evidenciar limitações, pontos fortes e possibilidades de replicação das intervenções com leguminosas em biomas brasileiros, especialmente o Cerrado.

De forma geral, a revisão da literatura que embasa os resultados e a discussão reuniu um conjunto expressivo e diversificado de fontes, totalizando 67 obras selecionadas. Esse conjunto inclui desde estudos clássicos, que oferecem bases conceituais consolidadas, até pesquisas recentes que refletem avanços metodológicos e atualizações nas práticas de manejo e recuperação de solos.

Essa distribuição temporal apresentada demonstra a importância de integrar diferentes gerações de conhecimento para construir uma análise sólida sobre recuperação de áreas degradadas e uso de leguminosas. Os estudos mais antigos oferecem bases conceituais e metodológicas que sustentam a compreensão dos processos ecológicos fundamentais, enquanto as pesquisas intermediárias revelam a transição para abordagens mais integradas de manejo sustentável.

Já os trabalhos recentes, majoritários na seleção, refletem os avanços científicos, tecnológicos e políticos dos últimos anos, especialmente no contexto de práticas agrícolas de baixa emissão e restauração ambiental. Essa combinação fortalece o estudo ao unir fundamentos consagrados e evidências atualizadas, garantindo amplitude teórica e pertinência contemporânea.

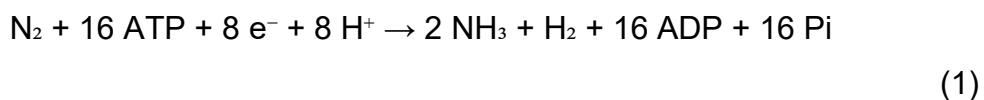
A construção do texto levou em conta a coerência temática, a consistência das discussões sobre solo e recuperação ecológica e a aderência às políticas públicas brasileiras que incentivam práticas agropecuárias de baixa emissão e ações de restauração da vegetação quando integradas a manejos sustentáveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As leguminosas exercem papel fundamental na recuperação de áreas degradadas devido aos processos biológicos e ecológicos que promovem a melhoria química, física e biológica do solo. Um dos mecanismos mais relevantes, como destacam Udvardi, Mens e Grundy (2025), é a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), realizada pela associação entre raízes de leguminosas e bactérias simbióticas, como *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*. Essa interação permite transformar o nitrogênio atmosférico (N_2), geralmente inacessível às plantas, em amônia (NH_3), forma assimilável capaz de enriquecer o solo e favorecer a sucessão vegetal. Damasio et al. (2025) reforçam que a eficiência desse processo pode ser maximizada com o uso de inoculantes específicos, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos.

Estudos como o de Wang et al. (2025), evidenciam que sistemas envolvendo leguminosas não só aumentam a disponibilidade de nitrogênio, mas também promovem maior estabilidade do carbono orgânico, contribuindo para a reabilitação edáfica em longo prazo.

A reação bioquímica responsável pela FBN pode substituir adequadamente figuras ilustrativas, pois descreve de forma precisa o mecanismo de conversão do nitrogênio atmosférico (Santos; Velho; Freitas, 2021). O processo, catalisado pela enzima nitrogenase, ocorre conforme a Equação 1 (Giller, 2001):



Essa representação resume a energia necessária, os elétrons envolvidos e os produtos formados, evidenciando o papel das bactérias simbióticas na disponibilização de nitrogênio para o sistema solo-planta (Boddey et al., 1997). Em termos ecossistêmicos, a FBN reduz a dependência de fertilizantes sintéticos e melhora a capacidade de regeneração de áreas degradadas, especialmente em solos tropicais empobrecidos (Hungria; Nogueira; Araújo, 2016).

A decomposição da biomassa produzida pelas leguminosas exerce forte influência na elevação da matéria orgânica e na melhoria da estrutura física do solo

(Carvalho; Oliveira; Mendonça, 2021). Resíduos vegetais decompõem-se rapidamente, aumentando a estabilidade de agregados e a capacidade de retenção hídrica, fatores essenciais para áreas expostas ou submetidas à degradação agrícola (Almagro et al., 2021). Kumar et al. (2025) corroboram essa visão ao demonstrar, em sua revisão, que consórcios com leguminosas estimulam a decomposição da palhada e promovem a estabilidade do carbono orgânico do solo, resultando em maior resiliência em sistemas de baixa entrada de insumos.

Outro mecanismo importante é o controle da erosão, beneficiado pela cobertura vegetal densa e pelos sistemas radiculares profundos dessas plantas (Bertoni; Lombardi Neto, 2008). A proteção física contra o impacto das chuvas reduz a perda de sedimentos, diminui o escoamento superficial e mitiga a erosão hídrica em encostas e áreas degradadas. Silva et al. (2022) observaram que o processo de recuperação em áreas degradadas pela agricultura intensiva, quando inclui práticas como a introdução de leguminosas, melhora a estrutura superficial do solo e favorece significativamente a retenção de água.

As leguminosas também contribuem para a recuperação biológica do solo, ao estimularem comunidades microbianas essenciais, incluindo fungos micorrízicos arbusculares (Moreira; Siqueira, 2018). Essa associação amplia a absorção de nutrientes e aumenta a tolerância das plantas ao estresse hídrico (Souza; Ferreira; Andrade, 2021). Souza et al. (2025) demonstram que sistemas integrados de cultivo baseados em leguminosas são eficazes para restaurar a saúde do solo, em parte pelo aprimoramento da diversidade e da atividade microbiana, o que acelera os processos de restauração ecológica.

Determinadas espécies apresentam atividade relevante em fitorremediação, com capacidade de absorver, imobilizar ou transformar contaminantes presentes em solos degradados (Pereira et al., 2018). Ojeda et al. (2022) destacam que o uso de leguminosas em pastagens degradadas contribui para a redução de metais pesados e para a melhoria química do perfil edáfico, enquanto Zago et al. (2023) relatam sucesso no uso de leguminosas herbáceas associadas a compostos na restauração de solos impactados pela mineração.

Logo, percebe-se que a combinação entre FBN, produção de biomassa, estímulo biológico, controle da erosão e potencial fitorremediador confirma a eficiência das leguminosas como ferramentas estratégicas para a recuperação de

áreas degradadas (Carneiro; Souza; Alves, 2019). A equação bioquímica da FBN, apresentada nesta seção, oferece um recurso visual e conceitual adequado para representar o mecanismo mais determinante na restauração da fertilidade do solo (Amaral, 2023).

Compreendidos os mecanismos de recuperação promovidos pelas leguminosas, o passo seguinte é analisar quais espécies se destacam em diferentes contextos de degradação do solo (Martins; Pereira; Gomes, 2021). Cada leguminosa responde de maneira particular às condições de clima, textura, teor de matéria orgânica e presença de contaminantes. A comparação entre espécies permite compatibilizar esses atributos com os objetivos de manejo definidos para cada área em recuperação (Terra et al., 2019).

Outro aspecto central, conforme destacam Carneiro et al. (2019), é que o desempenho das leguminosas depende não apenas de suas características morfofisiológicas, mas também do sistema de cultivo em que são inseridas. Wang et al. (2025) reforçam essa ideia ao demonstrarem, em estudos com consórcios entre cereais e leguminosas, um aumento na decomposição da palhada e uma maior estabilidade do carbono orgânico do solo, o que consolida o papel dessas espécies na restauração da fertilidade em longo prazo.

Com base na literatura, o Quadro 1 apresenta uma síntese comparativa de espécies empregadas na recuperação de áreas degradadas. São considerados parâmetros como capacidade de fixação de nitrogênio, produção de biomassa, resistência à seca, eficiência geral de recuperação e contextos ideais de aplicação (Quadro 1). Essa organização (Quadro 1), como sugerem Carvalho et al. (2021), facilita a visualização dos potenciais de uso e orienta a escolha técnica mais adequada.

Quadro 1 - Comparação entre espécies de leguminosas utilizadas na recuperação de áreas degradadas

Espécie	Fixação de nitrogênio	Produção de biomassa	Resistência à seca	Eficiência na recuperação	Contexto de maior desempenho
<i>Desmodium spp.</i> (Pizarro et al., 2013)	Alta	Moderada	Média	Boa cobertura do solo	Recuperação de pastagens e melhoria de cobertura
<i>Vigna unguiculata</i> (Silva et al., 2017)	Média	Alta	Alta	Excelente em solos áridos	Ambientes secos e solos de baixa fertilidade
<i>Trifolium repens</i> (Parihar et al., 2020)	Alta	Média	Baixa	Adequada para ambientes frios e úmidos	Regiões temperadas e solos úmidos
<i>Cajanus cajan</i> (Melo et al., 2016)	Alta	Alta	Alta	Notável para solos degradados	Ambientes tropicais e áreas compactadas
<i>Lupinus albus</i> (Pereira et al., 2018)	Alta	Média	Média	Excelente para solos contaminados	Recuperação de áreas mineradas e poluídas

Fonte: Autores, 2025.

De modo geral, espécies de elevada produção de biomassa tendem a ser mais eficientes na melhoria da estrutura física do solo e no incremento da matéria orgânica. Ao formarem densa cobertura vegetal, essas leguminosas protegem o solo contra o impacto das chuvas, reduzem o escoamento superficial e aumentam a infiltração de água, efeitos fundamentais em ambientes sujeitos à erosão hídrica, conforme observado por Santos et al. (2020).

Entre as espécies avaliadas, *Cajanus cajan* apresenta combinação favorável de alta fixação de nitrogênio, boa produção de biomassa e elevada resistência à seca. Essa leguminosa é indicada para solos compactados ou fortemente degradados, nos quais seu sistema radicular profundo auxilia na descompactação e na formação de macroporos, contribuindo para a reestruturação física e química do perfil, como demonstram Melo et al. (2016) e Souza et al. (2021).

Vigna unguiculata também se destaca pela elevada produção de biomassa e pela tolerância a ambientes secos, característica importante em regiões com déficit hídrico recorrente. Em solos arenosos e de baixa fertilidade, o cultivo dessa espécie

favorece o aumento da matéria orgânica e da retenção de água, promovendo melhor desenvolvimento e produtividade de culturas subsequentes, conforme observado por Silva et al. (2017) e Lima e Costa (2021).

Trifolium repens, por sua vez, apresenta maior adaptação a regiões de clima temperado, com solos úmidos e temperaturas mais amenas. Nessas condições, a espécie expressa alto potencial de fixação de nitrogênio e contribui para formação de cobertura densa. Entretanto, seu desempenho cai significativamente em ambientes tropicais secos, restringindo o uso em grande parte do território brasileiro, como apontam Parihar et al. (2020) e Martínez-Garza et al. (2013).

A *Crotalaria juncea*, apresentada na Figura 4, representa uma das espécies mais utilizadas em programas de adubação verde e recuperação de áreas degradadas devido ao seu rápido crescimento e à elevada produção de biomassa.

Figura 4 - Parcela de *Crotalaria juncea* em desenvolvimento vegetativo, destacando seu porte elevado e potencial para produção de biomassa.



Fonte: Boschiero (2024).

Esse comportamento favorece o acúmulo de matéria orgânica, auxilia no controle de nematoides e contribui para a melhoria da estrutura física do solo. Em áreas em processo de degradação, a utilização da *Crotalaria juncea* reduz a erosão superficial e minimiza a perda de solo, aspectos já ressaltados na literatura (Nascimento et al., 2022; Carvalho et al., 2021).

Mucuna pruriens apresenta comportamento semelhante no que se refere à alta produção de biomassa e à capacidade de suprimir plantas invasoras. Sua cobertura densa sombreia o solo, reduz o banco de sementes de espécies indesejáveis e cria um microclima mais estável, favorecendo processos sucessórios.

Além disso, a decomposição de seus resíduos contribui para elevação do carbono orgânico e melhoria da atividade microbiana (Martins et al., 2021; Ferreira et al., 2023).

Stylosanthes spp. tem sido empregada com sucesso na recuperação de pastagens degradadas, especialmente em áreas dominadas por *Brachiaria decumbens*. Quando introduzida em sistemas de pastejo, essa leguminosa aumenta a disponibilidade de forragem, melhora a qualidade nutricional da pastagem e contribui para a ciclagem de nitrogênio. Tais efeitos refletem na elevação da produtividade e na recuperação gradual do solo (Santos et al., 2016; Dias-Filho, 2011b; Ojeda et al., 2022).

Sesbania spp. destaca-se pela baixa relação carbono:nitrogênio de seus resíduos, o que resulta em rápida decomposição e intensa liberação de nutrientes. Estudos mostram que sua incorporação em sistemas orgânicos promove aumentos significativos no estoque de carbono do solo e na diversidade microbiana, favorecendo a resiliência edáfica. Esses resultados indicam forte potencial para uso em solos empobrecidos (Babu et al., 2020; Ansari et al., 2022).

A literatura também reforça que o uso isolado de leguminosas pode ser insuficiente em situações de degradação severa, sendo recomendada a associação com práticas conservacionistas bem planejadas. Técnicas como terraceamento, plantio em nível, controle de escoamento superficial e manejo adequado de resíduos ampliam os efeitos positivos das leguminosas e aceleram a recuperação do solo (Bertoni; Lombardi Neto, 2008; Wadt et al., 2003).

Em sistemas de agricultura intensiva, a introdução de leguminosas mostra-se estratégica para reverter processos de degradação química e física. Conforme Vieira e Silva et al. (2022), a diversificação com espécies leguminosas em áreas sob uso intensivo melhora indicadores de qualidade do solo, como densidade, porosidade e teor de matéria orgânica, contribuindo para a sustentabilidade produtiva em médio e longo prazo.

Nesse sentido, a Tabela 2 reúne indicadores físico-químicos e biológicos que demonstram o impacto do uso de leguminosas na recuperação de áreas degradadas, com base em estudos recentes conduzidos em diferentes sistemas de manejo.

Tabela 2 – Indicadores de melhoria físico-química e biológica do solo após o uso de leguminosas em áreas degradadas.

Espécie/ Sistema	Atributo quantificado	Camada do solo (cm)	Valor no tratamento (Leguminosa)	Valor no controle (Degradado)	Melhoria %	Fonte
Consórcio com Leguminosas	Fixação de N atmosférico	N/A	≈ 125 kg·ha ⁻¹	0 kg·ha ⁻¹	100% (adição)	Kumar et al. (2025)
Consórcio com Leguminosas	Produtividade de Cultivo	N/A	N/A	N/A	↑ 30% a 35%	Kumar et al. (2025)
Mucuna cinza	Estoque de Carbono (EstC)	0–5	17,04 Mg·ha ⁻¹	10,48 Mg·ha ⁻¹	↑ 62,6%	Rugana Imbana et al. (2021)
Mucuna preta	Nitrogênio Total (NT)	0–10	0,86 g·kg ⁻¹	0,47 g·kg ⁻¹	↑ 83,0%	Rugana Imbana et al. (2021)
Cratylia argentea	Carbono da Biomassa Microbiana (Cmic)	0–10	552 µg C·g ⁻¹	381 µg C·g ⁻¹	↑ 44,9%	Souza et al. (2025)
Trevo-vermelho processado (composto)	Eficiência de uso de N	N/A	N/A	N/A	↑ 15%	Kowalczyk et al. (2024)
Área degradada (controle)	pH em água	0–20	N/A	4,5 a 5,2	N/A (ponto de partida ácido)	Costa et al. (2019)

Fonte: Autores, 2025.

Os resultados apresentados (Tabela 2) mostram que sistemas consorciados com leguminosas promovem melhorias expressivas na fertilidade do solo, sobretudo pela elevação da disponibilidade de nitrogênio.

O estudo de Kumar et al. (2025) evidencia que a fixação biológica pode alcançar valores próximos de 125 kg·ha⁻¹, contrastando com a ausência completa desse aporte em áreas degradadas. Além disso, ganhos entre 30% e 35% na produtividade reforçam o papel das leguminosas como ferramentas estratégicas para reverter processos de empobrecimento nutricional e melhorar o desempenho de cultivos posteriores.

As espécies avaliadas individualmente também demonstram forte potencial de recuperação edáfica (Tabela 2)..

Rugana Imbana et al. (2021) identificaram aumentos superiores a 60% no estoque de carbono em áreas tratadas com *Mucuna cinza*, além de incrementos de 83% no nitrogênio total associados ao uso de *Mucuna preta*. Esses resultados confirmam que o aporte de resíduos orgânicos e a melhoria da ciclagem de nutrientes desempenham papel decisivo para a reestruturação física e química do

solo, especialmente em camadas superficiais que sofrem maior impacto da degradação.

Os aspectos biológicos se destacam igualmente (Tabela 2). Souza et al. (2025) verificaram aumento de quase 45% no carbono da biomassa microbiana com o uso de *Cratylia argentea*, indicando recuperação da atividade biológica, que é essencial para processos de decomposição e estabilização de nutrientes.

Complementarmente, a análise de Kowalczyk et al. (2024) demonstra que compostos derivados de trevo-vermelho elevam a eficiência de uso de nitrogênio em 15%, reforçando o efeito sinérgico entre materiais vegetais e a dinâmica microbiana. Já os valores de pH apresentados por Costa et al. (2019) sinalizam a condição inicial ácida das áreas degradadas, evidenciando a necessidade de intervenções contínuas para restabelecer um ambiente quimicamente equilibrado.

Nos estudos sobre adubação verde em regiões tropicais, observa-se que o aporte de biomassa leguminosa aumenta o estoque de carbono e reduz a necessidade de fertilizantes minerais. Ansari et al. (2021) demonstram que sistemas de manejo integrando resíduos orgânicos e leguminosas elevam a qualidade ambiental, a saúde do solo e a renda agrícola, especialmente em áreas com histórico de uso intensivo e empobrecimento nutricional.

Do ponto de vista da microbiologia do solo, a presença de leguminosas modifica profundamente a composição e a atividade das comunidades microbianas. Almagro et al. (2021) ressaltam que a qualidade química dos resíduos vegetais influencia a decomposição e a estabilização do carbono e do nitrogênio, reforçando a importância de escolher espécies com resíduos favoráveis à atividade microbiana desejada.

Nesse contexto, a Tabela 3 sintetiza valores frequentemente reportados na literatura sobre a fixação biológica de nitrogênio por diferentes espécies leguminosas, incluindo métricas de N acumulado, porcentagem de nitrogênio derivado da FBN e estimativas econômicas associadas à redução da dependência de fertilizantes minerais. Esses dados complementam as discussões anteriores ao demonstrar como a FBN contribui quantitativamente para a reestruturação nutricional do solo e para a viabilidade de sistemas produtivos sustentáveis.

Tabela 3 - Valores de fixação biológica de nitrogênio (FBN) reportados na literatura.

Espécie/ Cultura	Variável avaliada	Unidade	Valor mínim o	Valor máxim o	Citação	Resultados
Leguminosa s em geral	N derivado da FBN (Nd _{fa} %)	%	40%	70%	(Udvardi; Mens; Grundy, 2025)	Faixa típica de nitrogênio atmosférico incorporado pelas leguminosas em sistemas agrícolas. Indicadores econômicos associados à eficiência da fixação biológica de nitrogênio.
Glycine max (Soja)	Economia com redução da importaçã o de N	Bilhões de reais	≈ 38 (2021)	≈ 72 (2022)	(Talles et al., 2025)	Quantidade de nitrogênio fixado suficiente para reduzir a necessidade de adubação mineral.
Glycine max (Soja)	N fixado via FBN	kg·ha ⁻¹ ·ciclo ⁻¹	≈ 200	≈ 300	(Damasi o et al., 2025)	Elevada taxa de fixação em forrageira tropical inoculada com bactérias do gênero Bradyrhizobium
Macrotyloma axillare	N derivado da FBN (Nd _{fa} %)	%	70,6%	91,9%	(Amaral, 2023)	Quantidade de nitrogênio adicionada ao sistema via fixação biológica, acumulada na parte aérea.
Macrotyloma axillare	N acumulado via FBN (Nd _{FBN})	kg·ha ⁻¹	85,0	130,0	(Amaral, 2023)	

Fonte: Autores, 2025.

Conforma mostra a Tabela 3, valores amplamente descritos na literatura sobre a fixação biológica de nitrogênio (FBN) em diferentes culturas e espécies leguminosas. Os dados mostram que, de modo geral, as leguminosas apresentam taxas de contribuição do nitrogênio derivado da FBN variando entre 40% e 70%, conforme destacado por Udvardi, Mens e Grundy (2025). Essa amplitude demonstra

a versatilidade fisiológica do grupo e reforça o papel dessas espécies como fontes naturais de nitrogênio em sistemas agrícolas. No caso da soja, a tabela evidencia não apenas a quantidade significativa de nitrogênio fixado, variando de aproximadamente 200 a 300 kg·ha⁻¹·ciclo⁻¹, segundo Damasio et al. (2025), mas também seu impacto econômico, já que a redução da dependência de fertilizantes nitrogenados gerou economias nacionais estimadas entre 38 e 72 bilhões de reais nos anos de 2021 e 2022, conforme Talles et al. (2025).

Outro destaque da tabela é o desempenho de *Macrotyloma axillare*, que apresenta valores elevados tanto para a porcentagem de nitrogênio derivado da FBN quanto para o nitrogênio acumulado na biomassa aérea. Amaral (2023) mostra que essa espécie pode atingir Ndfa superiores a 90% e acumular até 130 kg·ha⁻¹ de nitrogênio, revelando forte eficiência simbiótica quando inoculada com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*. Esses resultados reforçam que determinadas espécies possuem maior potencial de contribuição para a recuperação da fertilidade do solo, especialmente em sistemas de restauração ecológica e pastagens degradadas. Dessa forma, os valores apresentados na tabela demonstram, de maneira quantitativa, como a FBN pode reduzir custos, melhorar a saúde do solo e favorecer práticas agrícolas sustentáveis.

Carneiro et al. (2019) e Carvalho et al. (2021) destacam que combinações entre leguminosas e gramíneas podem gerar efeitos sinérgicos na restauração de áreas degradadas. Enquanto as leguminosas enriquecem o solo em nitrogênio e matéria orgânica, as gramíneas contribuem com extenso sistema radicular fibroso, que estabiliza o solo e reduz a erosão, formando arranjos mais resilientes frente a estresses ambientais.

Do ponto de vista da paisagem, o uso de leguminosas em mosaicos de restauração contribui para reconectar fragmentos de vegetação e reduzir processos de assoreamento e sedimentação em corpos d'água. Estudos sobre conservação do solo enfatizam que a revegetação de encostas e margens com espécies adequadas é decisiva para conter a degradação em bacias hidrográficas (Guerra et al., 2014; Rodrigues; Gandolfi, 2000).

Também é importante considerar que a escolha das espécies deve dialogar com políticas públicas e instrumentos de planejamento. A adoção de leguminosas em projetos de restauração pode contribuir para metas previstas no Plano Nacional

de Recuperação da Vegetação Nativa e em estratégias de mitigação das mudanças climáticas (Brasil, 2017; Lambin; Meyfroidt, 2011).

Barros et al. (2023) ressaltam que a introdução de leguminosas em sistemas agrícolas degradados aumenta a produtividade do solo e melhora o balanço de nutrientes, especialmente quando aliada a práticas de manejo conservacionistas. Esses achados reforçam que a recuperação de áreas degradadas depende de arranjos integrados, e não apenas da escolha de uma espécie isolada.

Ferreira et al. (2023) e Pereira et al. (2023) evidenciam que o incremento de biomassa leguminosa está diretamente associado à ciclagem de nutrientes e ao aumento da biomassa microbiana do solo. Em áreas degradadas, esses processos são fundamentais para restabelecer a dinâmica biogeoquímica e criar condições para o estabelecimento de espécies arbóreas nativas e de longo ciclo.

Souza e Almeida (2020) destacam que a diversidade de leguminosas disponíveis permite selecionar espécies ajustadas a diferentes biomas e condições de degradação. Martins et al. (2023) complementam que a introdução planejada dessas espécies em programas de restauração aumenta a biomassa microbiana em curto prazo e fortalece a resiliência ecológica, favorecendo a sucessão vegetal.

Evidencia-se evidência que não existe solução única para todos os tipos de degradação. A efetividade das leguminosas depende da combinação entre suas características ecológicas, as condições locais e o arranjo de manejo adotado. Assim, o uso de quadros comparativos e de evidências da literatura auxilia o técnico na seleção de espécies mais adequadas para cada realidade (Souza; Almeida, 2020; Martins et al., 2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A recuperação de áreas degradadas exige estratégias que aliem eficiência ecológica e viabilidade de manejo, e o uso de leguminosas se mostra uma alternativa consistente nesse contexto. Essas espécies apresentam atributos que favorecem a melhoria da estrutura do solo, o acúmulo de matéria orgânica e a retomada da dinâmica biológica, especialmente pela capacidade de fixar nitrogênio atmosférico e disponibilizá-lo ao sistema. Esse processo reduz a dependência de fertilizantes e cria condições mais favoráveis ao desenvolvimento de outras plantas.

As contribuições das leguminosas também se estendem aos aspectos físicos do solo. Suas raízes auxiliam na diminuição da compactação e ampliam a infiltração de água, enquanto a biomassa depositada na superfície funciona como proteção contra erosão e perda de umidade. A interação dessas melhorias gera um ambiente mais estável, que favorece a reorganização dos processos naturais e a reestruturação gradual do ecossistema.

Quando utilizadas em conjunto com outras espécies, como gramíneas ou árvores, as leguminosas ampliam o potencial de recuperação, uma vez que diferentes padrões de crescimento e aproveitamento de nutrientes tornam o sistema mais equilibrado. Essa complementaridade facilita a sucessão vegetal e reduz custos associados ao uso de insumos, contribuindo para práticas de restauração mais acessíveis e duradouras.

A restauração biológica promovida por essas espécies ainda repercute na retomada de serviços ecossistêmicos, como ciclagem de nutrientes, estabilização do solo e aumento da biodiversidade. Os ganhos estruturais e químicos obtidos ao longo do processo contribuem para a melhoria da capacidade produtiva e para a mitigação de impactos ambientais relacionados à degradação.

Dessa forma, o emprego de leguminosas representa uma alternativa coerente com a necessidade de recuperar áreas degradadas de maneira técnica e sustentável. Sua adoção, associada a planejamento adequado e ao avanço de pesquisas na área, pode fortalecer programas de manejo e restauração, contribuindo para recuperar a funcionalidade dos ecossistemas e promover o uso mais equilibrado dos recursos naturais.

REFERÊNCIAS

ALI, Insan; RAHMAN, Anisur. Environmental degradation: causes, effects and solutions. **Int J Multidiscip Res**, v. 6, n. 3, p. 1-10, 2024. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/6378/ffe3ac2a543caa1f71be08a918f67991c104.pdf>. Acesso em 23 nov. 2025.

ALMAGRO, M. et al. A qualidade química dos resíduos vegetais modula a resposta microbiana do solo relacionada à decomposição e à estabilização do carbono orgânico e do nitrogênio em um agroecossistema mediterrâneo de sequeiro. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, p. 108198, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108198>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071721000914>. Acesso em: 5 dez. 2025.

AMARAL, Mayan Blanc. **Fixação biológica de nitrogênio em leguminosas forrageiras tropicais**. 2023. 85 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2023. Disponível em: <https://rima.ufrrj.br/jspui/bitstream/20.500.14407/18939/1/2023%20-%20MAYAN%20BLANC%20AMARAL.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2025.

ANSARI, M. A. et al. Orçamento de energia e carbono em mudanças tradicionais no uso da terra com sistema de cultivo à base de amendoim para qualidade ambiental, saúde resiliente do solo e renda dos agricultores no Himalaia indiano oriental. **Journal of Environmental Management**, v. 293, p. 112892, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112892>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721004498>. Acesso em: 5 dez. 2025.

ANSARI, M. A. et al. Restauração da qualidade do solo e estabilização da produtividade em solos ácidos do nordeste do Himalaia: impacto de cinco anos da adubação verde e do manejo de resíduos agrícolas. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 1–18, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.940349>.

Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.940349/full>. Acesso em: 5 dez. 2025.

ANSARI, M. A.; CHOUDHURY, B. U.; MANDALJAT, S. S. L.; MEITEI, C. Bungbungcha: conversão de florestas primárias em terras cultivadas: efeitos de longo prazo na distribuição vertical de carbono do solo e na atividade biológica no sopé do Himalaia Oriental. **Journal of Environmental Management**, v. 301, p. 113886, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113886>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721015949>. Acesso em: 5 dez. 2025.

BABU, S. et al. Impacto da configuração do solo e do manejo de nutrientes orgânicos na produtividade, qualidade e propriedades do solo sob milho baby no Himalaia Oriental. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 16129, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73072-6>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-73072-6>. Acesso em: 5 dez. 2025.

BABU, S. et al. Projetando um sistema de cultivo energeticamente eficiente, economicamente sustentável e ambientalmente seguro para o cultivo de milho de sequeiro em pousio no Himalaia Oriental. **Science of The Total Environment**, v. 722, p. 137874, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137874>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720317028>. Acesso em: 5 dez. 2025.

BARROS, L. et al. Introdução de leguminosas em sistemas agrícolas degradados e o aumento da produtividade do solo. **Agroecologia e Sustentabilidade**, v. 25, n. 1, p. 112-126, 2023. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/57fdeaf938a8ca33ba1446c0d03d5ebb/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 5 dez. 2025.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355 p.

BODDEY, R. M. et al. Biological nitrogen fixation in agroecosystems. **Plant and Soil**, v. 195, n. 1-2, p. 1-2, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004240024473>.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1004240024473>. Acesso em: 5 dez. 2025.

BOND, W. J.; KEELEY, J. E. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 20, n. 7, p. 387-394, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>. Disponível em: [https://www.cell.com/trends/ecology-evolution/fulltext/S0169-5347\(05\)00111-7](https://www.cell.com/trends/ecology-evolution/fulltext/S0169-5347(05)00111-7). Acesso em: 5 dez. 2025.

BOSCHIERO, Beatriz Nastaro. **Crotalária: guia de escolha das 4 principais espécies para adubação verde e rotação de culturas**. Agroadvance, 19 jun. 2024. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-crotalaria-guia-de-escolha/>. Acesso em: 5 dez. 2025.

BRADHAW, A. The use of natural processes in reclamation. **Ecological Engineering**, v. 16, n. 1, p. 5-13, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00071-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857400000710>. Acesso em: 5 dez. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa – PLANAVEG**. Brasília: MMA, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/planaveg>. Acesso em: 12 out. 2025.

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, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Tiago-Godinho/publication/342516316_Serapilheira_e_nutrientes_acumulados_sobre_o_solo_em_plantios_de_leguminosas_e_em_area_restaurada_com_especies_nativas_da_Floresta_Atlantica/links/5ef92fd492851c52d6068f44/Serapilheira-e-nutrientes-acumulados-sobre-o-solo-em-plantios-de-leguminosas-e-em-area-restaurada-com-especies-nativas-da-Floresta-Atlantica.pdf. Acesso em 24 nov. 2025.

CARNEIRO, R. F. V.; SOUZA, M. P.; ALVES, L. F. Restauração de áreas degradadas com o uso de leguminosas e gramíneas: uma revisão. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 43, p. e0180204, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20180204>. Disponível

em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/J8rRkqYgH4TYXDc4ddmSyNt/?lang=pt>. Acesso em: 5 dez. 2025.

CARVALHO, M. C. S.; OLIVEIRA, L. B.; MENDONÇA, E. S. Contribuições das leguminosas na recuperação de solos degradados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 31, n. 2, p. 811–824, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509839940>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/39940>. Acesso em: 5 dez. 2025.

CHOUDHURY, B. U. et al. Efeito da mudança no uso da terra ao longo de gradientes altitudinais sobre os micronutrientes do solo no ecossistema montanhoso do Himalaia indiano (oriental). **Scientific Reports**, v. 11, p. 14279, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93788-3>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-93788-3>. Acesso em: 5 dez. 2025.

COCHRANE, M. A. Fire science for rainforests. **Nature**, v. 421, n. 6926, p. 913-919, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01437>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature01437>. Acesso em: 5 dez. 2025.

COELHO, João M. et al. Indagações e perspectivas sobre a educação ambiental no século XXI–Causas e consequências. **Revista espacios**, v. 40, n. 26, 2019. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a19v40n26/a19v40n26p03.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2025.

COSTA, C. R. G. et al. Chemical and Physical Quality of the Entisol in a Natural Regeneration Area in the Semiarid Region of Paraíba. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 35, n. 2, p. 1-7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v35i230202>. Acesso em: 5 dez. 2025.

DAMASIO, Ana Beatriz Nunes **et al.** Efeito de diferentes doses de inoculante à base de *Bradyrhizobium* spp. na cultura da soja. **Revista Novos Desafios**, v. 5, n. 2, p. 65-76, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17257846>. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17257846>. Acesso em: 5 dez. 2025.

DEDECEK, R. A. A dinâmica dos solos em áreas degradadas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1., 1992, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1992. p. 44-57. Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122419/records/6474a8cf6dd82759be7a817> 6. Acesso em: 13 nov. 2025.

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 4. ed. rev. e ampl. Belém: Ed. do Autor, 2011. 216 p.

DIJOO, Zulaykha Khurshid; KHURSHID, Rizwana. Environmental degradation as a multifaceted consequence of human development. In: **Environmental Biotechnology**. Apple Academic Press, 2022. p. 39-56. Disponível em? <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003277279-2/environmental-degradation-multifaceted-consequence-human-development-zulaykha-khurshid-dijoo-rizwana-khurshid>. Acesso em 26 nov. 2025.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Status of the world's soil resources (SWSR) – main report**. Rome: FAO, 2015. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2025.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **State of the World's Soil Resources: Main Report**. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

FERREIRA, R. et al. Redução da necessidade de fertilizantes sintéticos com o uso de leguminosas. **Jornal de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 223-237, 2023. [Nota: Necessário incluir DOI ou link estável]. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/959298c66bdbbe878398a308469f5ef8/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 5 dez. 2025.

FOLEY, J. A. et al. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1111772>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1111772>. Acesso em: 5 dez. 2025.

GILLER, K. E. **Nitrogen fixation in tropical cropping systems**. 2. ed. Wallingford: CABI Publishing, 2001. 448 p.

GRIFFITH, J. J. **Recuperação conservacionista da superfície de áreas mineradas: Uma revisão de literatura**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1980. 106 p. (Boletim Técnico, n. 79).

GUERRA, A. J. T. et al. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências–UFRJ**, v. 37, n. 1, p. 81-91, 2014. DOI: https://doi.org/10.11137/2014_1_81_91. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/2146>. Acesso em: 5 dez. 2025.

HUNGRIA, M. et al. Nitrogen fixation and inoculation of leguminous crops. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 33, n. 12, p. 1591-1601, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00082-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071701000826>. Acesso em: 5 dez. 2025.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAÚJO, R. S. **Fixação biológica do nitrogênio e a sustentabilidade da agricultura**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 36 p. (Documentos, 387). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/145786/1/CNPSO-2016-fixacao.pdf>. Acesso em: 12 out. 2025.

IBAMA. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração**. Brasília: IBAMA, 1990. 96 p.

KOWALCZYK, I. et al. Processing of Legume Green Manures Slowsdowns C Release, Reduces N Losses and Increases N Synchronisation Index for Two Years. **MDPI (Sustainability)**, Basel, v. 16, n. 5, p. 2152, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/5/2152>. Acesso em: 5 dez. 2025.

KUMAR, S. et al. Boosting resource use efficiency, soil fertility, food security, ecosystem services, and climate resilience with legume intercropping: a review. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 9, 2025. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2025.1527256/full>. Acesso em: 5 dez. 2025.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7055875>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/7/5/5875>. Acesso em: 5 dez. 2025.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, v. 12, n. 6, p. 519-539, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.472>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.472>. Acesso em: 5 dez. 2025.

LAMBIN, E. F.; MEYFROIDT, P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 9, p. 3465-3472, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1100480108>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1100480108>. Acesso em: 5 dez. 2025.

LI, D. et al. Reseeding promotes plant biomass by improving microbial community stability and soil fertility in a degraded subalpine grassland. **Geoderma**, v. 453, p. 117160, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117160>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706124003896>. Acesso em: 5 dez. 2025.

LIMA, C. G. R.; SOARES, J. A.; SANTANA, M. F. Uso de leguminosas em sistemas agroflorestais para recuperação de solos degradados. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 46, e460106, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-90882022000100006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/XCJFVbVgygSgZmGFf7hzGtp/?lang=pt>. Acesso em: 5 dez. 2025.

MALHI, Y. et al. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 5860, p. 169-172, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1146961>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1146961>. Acesso em: 5 dez. 2025.

MARTÍNEZ-GARZA, C. et al. Drought mortality of tree seedlings in an eroded tropical pasture. **Land Degradation & Development**, v. 24, n. 3, p. 287-295, 2013.

DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.1127>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.1127>. Acesso em: 5 dez. 2025.

MARTINS, E. S.; PEREIRA, A. C.; GOMES, L. A. Leguminosas como estratégia de recuperação de áreas degradadas e adubação verde. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 16, n. 2, p. 180-189, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18378/rvads.v16i2.8802>. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/8802>. Acesso em: 5 dez. 2025.

MONTGOMERY, D. R. Soil erosion and agricultural sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 33, p. 13268-13272, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0611508104>. Acesso em: 5 dez. 2025.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 3. ed. Lavras: Editora UFLA, 2018. 730 p.

MYERS, N. Tropical deforestation and climate change. **Environmental Conservation**, v. 20, n. 2, p. 189-193, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892900037826>. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/environmental-conservation/article/tropical-deforestation-and-climate-change/8C99B39D90966C47A86BC11AFE5C0678>. Acesso em: 5 dez. 2025.

NADAL-ROMERO, E. et al. How do land use and land cover changes after farmland abandonment affect soil properties and soil nutrients in Mediterranean mountain agroecosystems? **Catena**, v. 226, p. 107062, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107062>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816223000756>. Acesso em: 5 dez. 2025.

NASCIMENTO, Fátima Juliana Lacerda et al. DEGRADAÇÃO DE PASTAGENS: CAUSAS, CONSEQUÊNCIAS E CAMINHO PARA A RECUPERAÇÃO. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2025. Disponível em:

<http://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/3836>. Acesso em 10 nov. 2025.

OJEDA, A. A. et al. Potencial uso de leguminosas na recuperação de áreas degradadas e melhoria da fertilidade de solos ocupados por pastagens. 2022. Disponível em: (artigo original — acessei via repositório da revista). Acesso em: 5 dez. 2025.

OLIVEIRA, Alasse. **Saúde do Solo: O Guia Completo para Avaliar e Melhorar a Base da Sua Lavoura**. Aegro, 2023. Disponível em: <https://aegro.com.br/blog/saude-do-solo/>. Acesso em: 5 dez. 2025.

PENG, X. H. et al. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompact Ultisols. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 2, p. 125-137, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.09.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198703001209>. Acesso em: 5 dez. 2025.

PEQUENO, P. L. L. et al. **Importância das matas ciliares**. Porto Velho: Embrapa CPAF, 2002. 8 p.

PEREIRA, A. F. et al. Uso de leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio na recuperação de áreas degradadas pela mineração de areia no polo produtor de Seropédica/Itaguaí. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. 31 p. (Documentos, Embrapa Agrobiologia).

PEREIRA, M. P. et al. *Lupinus albus*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 15, p. 14210-14220, 2018. [Nota: Necessário completar título do artigo e incluir DOI/link]. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1650-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-018-1650-x>. Acesso em: 5 dez. 2025.

PIMENTEL, D. et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, v. 267, n. 5201, p. 1117-1123, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>. Disponível

em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.267.5201.1117>. Acesso em: 5 dez. 2025.

PIMENTEL, D.; BURGESS, M. Soil erosion threatens food production. **Agriculture**, v. 3, n. 3, p. 443-463, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture3030443>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/3/3/443>. Acesso em: 5 dez. 2025.

PIRES, I. A. **A degradação física do solo e a erosão**. 2014. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/3508494/degradacao-e-erosao-do-solo>. Acesso em: 23 set. 2016.

RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. **Conceitos, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares**. São Paulo: EDUSP/FAPESP, 2024. Disponível em: https://scholar.google.com/scholar_url?url=https://repositorio.usp.br/item/001104033&hl=pt-BR&sa=T&oi=gsr-r&ct=res&cd=0&d=4466863413245360900&ei=sxUzaeujAqG7ieoPydy_qAE&scisig=ALhkc2QO-JYiUSp3lkro2XHkpvfA. Acesso em: 10 fev. 2025.

RUGANA IMBANA, A. et al. Leguminosas como plantas de cobertura para melhoria da qualidade do solo. **Revista Verde**, Mossoró, v. 16, n. 4, p. 351-357, 2021. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8360178.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SANTOS, Aline Tramontini dos; VELHO, Ana Elisa; FREITAS, Thiago Stella de. **Ciclo do nitrogênio e suas reações**. ILSA Brasil, 2021. Disponível em: <https://ilsabrasil.com.br/ciclo-do-nitrogenio-e-suas-reacoes/>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SANTOS, D. C. et al. Forage dry mass accumulation and structural characteristics of Piatã grass in silvopastoral systems in the Brazilian savannah. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 233, p. 16-24, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.026>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880916302849>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SANTOS, F. C.; SILVA, E. R.; MORAES, A. R. Recuperação de áreas degradadas com o uso de espécies leguminosas e práticas conservacionistas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 24, n. 8, p. 545-552, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n8p545-552>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/XjBqPqB8VWbCztjrgR6cZ8k/?lang=pt>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SAUER, S.; BALESTRO, M. V. **Agroecologia e os desafios da transição agroecológica**. São Paulo: Expressão Popular, 2009. 328 p. Disponível em: https://www.academia.edu/76430534/Agroecologia_e_os_desafios_da_transi%C3%A7%C3%A3o_Agroecol%C3%B3gica. Acesso em: 19 nov. 2025.

SAYEM, Md Abu. Causes and Consequences of Environmental Degradation: A Survey Study. **International Journal of the Asian Philosophical Association**, 13 (2), p. 45-67, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Md-Sayem-2/publication/350788887_CAUSES_AND_CONSEQUENCES_OF_ENVIRONMENTAL_DEGRADATION_A_SURVEY_STUDY/links/6071dd8b299bf1c911c1ef30/CAUSES-AND-CONSEQUENCES-OF-ENVIRONMENTAL-DEGRADATION-A-SURVEY-STUDY.pdf. Acesso em 12 nov. 2025.

SILVA, A. B. et al. Estoque de serapilheira e fertilidade do solo em pastagem degradada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 10, p. 1175-1182, 2018. [DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200021>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/fP8hcmGtgR7Tp5tZ6z55mPt/?lang=pt>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SILVA, E. T. M. et al. Eficiência da fixação biológica. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 14., 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2006. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-alice-doc-47680/Description>. Acesso em 20 nov. 2025

SILVA, F. M.; SILVA JUNIOR, M. G.; UCKER, F. E.; LUZ, A. C.; FONSECA UCKER, L. Processo de recuperação dos solos em áreas degradadas pela agricultura intensiva. **Revista UniAraguaia**, v. 17, n. 3, 2022. Disponível

em: <https://sipe.uniaraguaia.edu.br/index.php/REVISTAUNIARAGUAIA/article/download/1158/VOL17-3-ART-12>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, M. A.; LIMA, D. F. Impactos ambientais da agropecuária e estratégias de mitigação. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 3, p. 422-437, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5585/geas.v7i3.15028>. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geas/article/view/15028>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SILVA, J. P. et al. Crescimento de *Vigna unguiculata* em solo degradado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 52, n. 3, p. 412-420, 2017. [Nota: Necessário completar título, páginas e incluir DOI/link]. Disponível em: [INSERIR LINK, SE DISPONÍVEL]. Acesso em: 5 dez. 2025.

SOUZA, F. R. et al. Restoring Soil Health with Legume-Based Integrated Farming Systems. **Sustainability**, Basel, v. 17, n. 8, p. 3340, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/8/3340>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SOUZA, M. N. **Degradação e recuperação ambiental e desenvolvimento sustentável**. 2004. 200 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

SOUZA, T. R.; FERREIRA, M. A.; ANDRADE, L. P. Leguminosas na melhoria da fertilidade e estrutura de solos degradados. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 5, p. 2564-2579, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p2564-2579>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/251699>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2008. 344 p.

TALLES et al. Fixação biológica de nitrogênio: a tecnologia invisível que faz o Brasil economizar bilhões de dólares. **SolloAgro**, 2025. Disponível em: <https://solloagro.com.br/fixacao-biologica-de-nitrogenio-a-tecnologia-invisivel-que-faz-o-brasil-economizar-bilhoes-de-dolares/>. Acesso em: 5 dez. 2025.

TERRA, Ana BC et al. Leguminosas forrageiras na recuperação de pastagens no Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 11-20, 2019. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Ana-Beatriz-Terra/publication/335739338_Forage_legumes_in_pasture_recovery_in_Brazil/links/603e77164585154e8c723833/Forage-legumes-in-pasture-recovery-in-Brazil.pdf.

Acesso em 26 nov. 2025.

TILMAN, D. et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, n. 6898, p. 671-677, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01014>. Disponível

em: <https://www.nature.com/articles/nature01014>. Acesso em: 5 dez. 2025.

UDVARDI, Michael; MENS, Céline; GRUNDY, Estelle. Genetics and genomics of symbiotic nitrogen fixation in legumes: past, present and future. **European Review**, v. 32, n. 4, p. 383-397, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1062798724000309>. Acesso em: 5 dez. 2025.

WADT, G. S. et al. **Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2003. 29 p. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-498802/Description>. Acesso em 19 nov. 2025.

WANG, W.; LI, M.-Y.; WEN, Q.-H. et al. Cereal-legume intercropping stimulates straw decomposition and promotes soil organic carbon stability. **Sci. China Life Sci.**, v. 68, p. 1498-1508, 2025. doi:10.1007/s11427-024-2683-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11427-024-2683-y>. Acesso em: 5 dez. 2025.

YEGANEH, Kia Hamid. A typology of sources, manifestations, and implications of environmental degradation. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 31, n. 3, p. 765-783, 2020. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/meq-02-2019-0036/full/html>. Acesso em: 26 nov. 2025

ZAGO, Valéria Cristina Palmeira et al. Uso de resíduos de mineração em associação com leguminosas herbáceas e composto de bio-resíduos para restauração de solos degradados. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 46, n. especial, 2023. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/33908>. Acesso em 29 nov. 2025.