
Processos de degradação ambiental, demanda por madeira e manejo em florestas plantadas

Maurício Novaes Souza, Jacyelli Sgranci Angelos, Maria Eduarda Marques da Conceição, Mateus Zava Zucolotto, Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira, Rodrigo Dal-Sasso Lourenço

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-25-1.c5>

Resumo

O aumento da exploração das florestas nativas, a remoção dos remanescentes florestais, as mudanças de uso do solo para impulsionar a produção agropecuária, o uso inadequado e intensivo das pastagens sem manejo adequado, contribuem para a deterioração do solo, transformando essas terras em áreas improdutivas: tem como resultado uma ampliação considerável das áreas degradadas no Brasil. Paralelamente, em todo o mundo, há uma crescente demanda por madeira. Nesse contexto, as florestas plantadas assumem um papel fundamental em procedimentos de recuperação de ambientes degradados, desempenhando funções essenciais na economia, no fornecimento de matérias-primas e na conservação ambiental, destacando-se no cenário brasileiro por nossas condições edafoclimáticas privilegiadas. No entanto, esses agroecossistemas também enfrentam desafios significativos relacionados aos processos de degradação, exigindo uma abordagem cuidadosa de manejo para garantir sua sustentabilidade em longo prazo. Os principais processos de degradação são a erosão do solo; a perda de biodiversidade; e pragas e doenças. A principal solução está em se realizar o manejo sustentável das florestas, que incluem a diversificação de espécies; práticas silviculturais responsáveis; monitoramento e controle de pragas. Ou seja, o manejo eficaz de florestas plantadas requer uma abordagem integrada que leve em consideração os processos de degradação e os princípios da sustentabilidade. Ao adotar práticas responsáveis de manejo e promover a diversidade ecológica, como nos sistemas integrados de produção (por exemplo, SAFs e ILPF) que favorecem a ciclagem de nutrientes, podem-se garantir a qualidade e a produtividade desses importantes ecossistemas para as gerações futuras.

Palavras-chave: Degradação ambiental. Ciclagem de nutrientes. Manejo sustentável. Diversidade ecológica. Perspectivas.

1. Introdução

O aumento da exploração dos recursos naturais acompanhado da retirada dos remanescentes florestais para intensificar a produção agropecuária, tem provocado significativa degradação ambiental e ampliação das áreas degradadas. O uso inadequado e intensivo das pastagens, por exemplo, sem manejo adequado, resulta em terras improdutivas (Moreira; Simioni; Oliveira, 2017; Nascimento; Souza, 2022; Souza, 2024). Diante dessa realidade, surge a necessidade de efetuar plantios que visem restabelecer a cobertura florestal e promover a recuperação ecossistêmica do ambiente (Romanelli *et al.*, 2022).

A partir do crescimento populacional elevado juntamente com a ascensão da renda média per capita e aumento da população urbana, estabeleceu-se uma nova perspectiva de consumo em nível global, o que refletiu diretamente na elevação da demanda por madeira e seus derivados. A partir deste novo padrão, a indústria de base florestal tem ampliado o uso de madeira proveniente de florestas plantadas, as quais surgem como resposta à legislação ambiental e à escassez resultante quando a oferta de madeira nativa não supre à demanda do mercado florestal (Silva; Sales, 2018; Almeida *et al.*, 2023). Essa abordagem, além de seu aspecto de mercado, representa uma estratégia que proporciona benefícios ambientais ao reduzir a pressão exercida sobre os ecossistemas naturais (Castro, 2008; Souza, 2022; 2024).

A área global de floresta plantada apresentou um crescimento de 123 milhões de hectares nas últimas três décadas, com uma taxa de crescimento médio de 4,1 milhões de hectares ano⁻¹ e uma área total de 294 milhões de hectares, o que representa apenas 7% da área total de floresta global (FAO, 2020). Já o Brasil apresenta uma área total de 9,94 milhões de hectares de florestas plantadas, com um amplo predomínio do gênero *Eucalyptus*, representando 76% da área total, seguido por *Pinus* com 19%, *Seringueira*, *Teca* e *Acácia* que somados chegam a 5% (IBA, 2023).

Considerando as extensas áreas de cobertura florestal no território brasileiro, aliadas às condições edafoclimáticas favoráveis à silvicultura, conferem ao Brasil uma posição privilegiada para atividades florestais em comparação com o restante do mundo (Fortaleza *et al.*, 2019). Para isso, são

empregadas espécies arbóreas de crescimento acelerado, por meio de plantios homogêneos ou em consórcio com outras culturas (Cordeiro *et al.*, 2015).

Nesse contexto, certas espécies, como o eucalipto, destacam-se por exibirem atributos pertinentes para a consecução dos propósitos almejados por tais plantações. Amplamente utilizadas e adaptadas às diferentes condições de sítio brasileiro, as espécies de eucalipto têm sido preferenciais devido ao seu rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões e condições do local, e flexibilidade de manejo e integração com outras atividades agropecuárias. Além disso, o eucalipto oferece um potencial econômico significativo, sendo sua madeira utilizada para uma variedade de fins, como energia, celulose, laminação, serraria, medicamentos, cosméticos, entre outros (Lourenço, 2024).

De acordo com dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), o Brasil se destaca internacionalmente pelo potencial produtivo do cultivo de eucalipto, apresentando ciclos de cultivo mais curtos, com uma média de 6,7 anos. Este destaque é atribuído não apenas às condições edafoclimáticas favoráveis, mas também ao investimento significativo em tecnologias e pesquisas no manejo florestal e melhoramento genético. Segundo o Relatório Anual de 2022 da IBÁ, o incremento médio anual de madeira (IMA – $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) aumentou de forma expressiva, passando de $10 \text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ em 1971, para impressionantes $38,9 \text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ em 2021. Esse avanço evidencia a eficiência e o progresso das tecnologias empregadas nas últimas décadas (IBÁ, 2023).

Apesar do incremento produtivo obtido nos últimos anos, o cultivo florestal, em específico do gênero *Eucalyptus*, apresenta um potencial produtivo a ser explorado. De acordo com Elli (2019), o potencial produtivo apresenta uma variabilidade temporal e espacial e está condicionada à fatores bióticos e abióticos. O autor destaca um potencial produtivo médio de $87 \text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ para o Brasil, com uma variação dentro do intervalo de 45 a $108 \text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Diante do exposto, faz-se necessário uma compreensão de todos os fatores de produção e suas respectivas interações, para que práticas de manejo possam ser adotadas a fim de minimizar esse *yield gap*.

Entre os fatores limitantes de produção, destaca-se o déficit hídrico que atua diretamente no mecanismo de condutância estomática, que por sua vez

afeta o processo de fotossíntese e transpiração. Além dos fatores relacionados a variabilidade no perfil de crescimento entre materiais genéticos, condições de sítio, manejo florestal, espaçamento de plantio e arranjo florestal (Nardini *et al.*, 2021), heterogeneidade, competição intraespecífica e interespecífica (Binkley *et al.*, 2010, 2013; Hakamada *et al.*, 2020), manejo nutricional.

No caso específico de explorações florestais, considerando esses sistemas intensivos de produção, a reposição de nutrientes é fundamental para a sustentabilidade do ecossistema. Isso porque os nutrientes minerais representam um recurso indispensável ao crescimento e desenvolvimento vegetal: a remoção de árvores e outras plantas durante a exploração florestal retiram grandes quantidades de nutrientes do solo. Se esses nutrientes não forem repostos, a fertilidade do solo diminui ao longo do tempo, o que pode prejudicar o crescimento futuro das árvores e outras plantas. Ou seja, a reposição de nutrientes em explorações florestais é essencial para manter a resistência e resiliência do ecossistema em longo prazo, promovendo a sustentabilidade ambiental e econômica da atividade florestal.

A expansão dos cultivos florestais no Brasil vem ocorrendo majoritariamente em áreas previamente antropizadas, com elevado grau de intemperismo, normalmente em conversão de áreas de pastagens com baixa fertilidade, elevada acidez e regimes hídricos irregulares. Essas condições edafoclimáticas específicas favorecem às perdas de produtividade e conseqüentemente aumento do *yield gap*. Neste cenário, a ciclagem de nutrientes representa um dos aspectos fundamentais para a manutenção da produtividade florestal. Esse fenômeno pode ser afetado de acordo com a intensidade das técnicas de manejo do solo e das práticas silviculturais adotadas (Correia; Andrade, 1999; Moreira; Simioni; Oliveira, 2017; Oliveira *et al.*, 2021).

Em um ecossistema florestal, a quantidade de nutrientes é determinada pelo somatório dos diferentes compartimentos das árvores (folhas, casca, ramos, lenho), vegetação do sub-bosque, serapilheira e solo. Sabe-se que cada compartimento de uma árvore possui diferentes concentrações de elementos químicos em seus tecidos. Geralmente, observa-se um gradiente que apresenta a seguinte tendência com relação ao teor desses nutrientes: folhas > casca > ramos > lenho (Poggiani *et al.*, 1998; Rengasamy, 2010).

Dessa forma, a ciclagem de nutrientes pode ser prejudicada em função do manejo que é praticado, considerando que a exploração florestal é a atividade que, em termos absolutos, mais remove nutrientes do ecossistema. Essa quantidade, removida ou exportada, depende de diversos fatores, tais como: a) espécie ou tipo de clone; b) densidade do plantio; c) duração da rotação ou idade do corte; d) qualidade do sítio e componente da árvore explorado; e e) disponibilidade de água no solo. Sabe-se que os solos das regiões tropicais são em geral muito intemperizados e possuem pequena reserva de minerais; portanto, a sua contribuição para a nutrição das árvores é muito reduzida (Barros; Novais, 1990; Novais; Barros; Neves, 1990; Barros, 2003; Madureira, 2021; Oliveira *et al.*, 2021).

De acordo com esses mesmos autores, em sistemas de manejo mais intensivos, geralmente aplicados às florestas plantadas do Brasil, a possibilidade de se ter um ciclo de nutrientes mais balanceados é pequena, principalmente devido: a) ao curto período de rotação; b) às elevadas produtividades obtidas; c) à reposição apenas parcial dos nutrientes exportados; e d) à grande perda de nutrientes, principalmente pela erosão, posto que os plantios, em muitos casos, são implantados em regiões de topografia acidentada e, ou, solos de textura arenosa. Atualmente, esses fatores são agravados pelo desenvolvimento de clones que proporcionam as duas primeiras circunstâncias.

Portanto, para Barros (2003) e Barros (2021), quanto melhor e completo for o entendimento do sistema solo, melhor podem-se prever os efeitos das práticas de manejo florestal sobre a sua capacidade produtiva, particularmente no Brasil, onde os plantios de *Eucalyptus* e de *Pinus* têm sido realizados nos tipos mais variados de solos, que apresentam teores disponíveis e totais de nutrientes numa faixa bastante larga, sob diferentes manejos.

É importante ressaltar, que em florestas de clima temperado, a maior parte dos nutrientes do sistema está contida no solo, o que não ocorre em florestas de clima tropical, onde a vegetação é o maior reservatório de nutrientes do ecossistema. Caso ocorram situações de estresses, como o uso de fogo ou práticas que revolvam demasiadamente o solo, nas plantações florestais tropicais, a depleção de nutrientes causada pela exploração florestal, será muito mais drástica que naquelas de regiões temperadas (Barros; Novais, 1990;

Oliveira *et al.*, 2021).

Há que se considerar, particularmente nos trópicos, onde grande parcela de matéria orgânica e dos nutrientes permanece na biomassa vegetal (mais de três quartos de carbono), sendo reciclada dentro da estrutura orgânica do sistema, com o auxílio de várias adaptações biológicas que conservam nutrientes, inclusive simbiose mutualística entre organismos e plantas (Odum, 1988; Oliveira *et al.*, 2021).

Os consórcios de culturas agrícolas com espécies arbóreas podem ser utilizados para restaurar florestas e recuperar áreas degradadas. A tecnologia ameniza limitações do terreno, minimiza riscos de degradação inerentes à atividade agrícola e otimiza a produtividade a ser obtida (Bendito *et al.*, 2017; Souza, 2024) (Figura 1).



Figura 1. Solo úmido sob consórcio de culturas agrícola e pecuária: café, banana, amendoim forrageiro e braquiária. Fonte: Acervo UFV, 2024.

Os sistemas agroflorestais (SAF) se apresentam como uma alternativa que pode vir a acelerar a recuperação das áreas degradadas, utilizando nela espécies nativas do local, junto com espécies exóticas, podendo restabelecer o equilíbrio químico, físico e biológico do solo, com a introdução de adubos verdes (Mallmann *et al.*, 2018; Nascimento; Souza, 2022; Almeida *et al.*, 2023).

O sistema integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) propõe o cultivo de

espécies florestais em consórcio com pastagens ou cultivos agrícolas, a fim de aperfeiçoar o aproveitamento da área e a produtividade. Esta é uma ferramenta tecnológica de grande importância na recuperação de solos de pastagens degradadas, permitindo maior aporte de C no solo, além da maior ciclagem de nutrientes. Os sistemas silvipastoris podem reabilitar pastagens degradadas e aumentar o estoque de C e N em solos tropicais e subtropicais (Martins; Souza, 2013; Silva *et al.*, 2020). A diversificação do que se tem produzido sob sistemas integrados, resultam em um sinergismo entre os componentes florestal, pecuário e agrícola (Nascimento; Souza, 2022).

2. Ciclagem de nutrientes

Considerando todo o ciclo de desenvolvimento das espécies, desde o plantio até a senescência, o mecanismo de absorção dos nutrientes pode ser compreendido por intermédio da análise das fases de desenvolvimento das plantas, que podem ser representadas por três ciclos distintos: geoquímico, bioquímico e biogeoquímico. O entendimento completo dos processos que ocorrem em cada um desses ciclos é particularmente fundamental para as florestas plantadas, pois esses processos têm um impacto direto na produção e um manejo inadequado pode levar à exaustão e à degradação do solo. Em contraste, nas florestas naturais, os nutrientes não são considerados um fator de produção, pois constituem um sistema fechado (Barros; Novais, 1990; Barros, 2000; 2003; Madureira, 2021).

A microbiota do solo desempenha um papel fundamental na decomposição dos resíduos orgânicos, na ciclagem de nutrientes e no fluxo de energia no solo, influenciando tanto a transformação da matéria orgânica quanto o armazenamento de C e nutrientes minerais (Ferreira; Stone; Martin-Didonet, 2017).

Pesquisas recentes apontam que o uso de bioestimulantes¹ em conjunto com práticas de revegetação representa uma abordagem promissora para melhorar a fertilidade do solo, influenciar positivamente a microbiota do solo e

¹ São substâncias naturais que podem incluir extratos de algas, aminoácidos, vitaminas, ácidos húmicos e fúlvicos, entre outros compostos orgânicos.

promover uma maior produtividade vegetal, além de favorecer a ciclagem de nutrientes. Os bioestimulantes são produtos que estimulam processos fisiológicos naturais nas plantas, auxiliando no crescimento, desenvolvimento e resistência a estresses bióticos e abióticos. Podem ser compostos por uma variedade de substâncias, como aminoácidos, peptídeos, ácidos húmicos e fúlvicos, entre outros (Caron; Graças; Castro, 2015; Santana *et al.*, 2020; Burak *et al.*, 2021).

Para esses mesmos autores, a associação de bioestimulantes com a revegetação é particularmente benéfica em áreas degradadas, onde a fertilidade do solo pode estar comprometida devido à perda de nutrientes e matéria orgânica. Os bioestimulantes ajudam a melhorar a atividade microbiana do solo, promovendo a decomposição de resíduos orgânicos e a liberação de nutrientes essenciais para as plantas. Além disso, eles podem aumentar a absorção de nutrientes pelas plantas, melhorar a qualidade do solo e aumentar a resistência das plantas a condições adversas.

Essa abordagem integrada também pode ter benefícios ambientais significativos, como a redução da erosão do solo, a promoção da recuperação de áreas degradadas e o sequestro de carbono atmosférico. Além disso, ao melhorar a fertilidade do solo e promover o crescimento vegetal, ela pode contribuir para a conservação da biodiversidade e a manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais.

No entanto, é importante ressaltar que mais pesquisas são necessárias para entender completamente os efeitos dos bioestimulantes em diferentes tipos de solos, condições climáticas e sistemas de cultivo. Além disso, é fundamental considerar a sustentabilidade em longo prazo dessas práticas e garantir que elas sejam economicamente viáveis e socialmente aceitáveis para os agricultores e comunidades locais (Santana *et al.*, 2020).

Os bioestimulantes têm despertado um interesse crescente no setor de plantios comerciais florestais devido ao seu potencial para promover vários aspectos benéficos. Podem estimular o crescimento radicular, acelerando o estabelecimento das mudas e aumentando a taxa de sobrevivência. Além disso, os bioestimulantes têm demonstrado a capacidade de aumentar a taxa de crescimento das plantas, melhorar sua saúde e aumentar a eficiência no uso de

nutrientes. Esses benefícios não só aumentam a produtividade das plantações florestais, mas também contribuem para a sustentabilidade dos sistemas de cultivo. Esse aspecto é especialmente fundamental no contexto dos plantios florestais, onde o aperfeiçoamento desses fatores pode ter impactos significativos no sucesso da plantação e na qualidade geral do ecossistema florestal (Teixeira; Santa-Cecília; Leite, 2018).

No entanto, de acordo com esses mesmos autores, é importante ressaltar que os efeitos dos bioestimulantes podem variar dependendo das condições específicas do sítio de plantio, das espécies florestais envolvidas e da formulação do produto utilizado. Portanto, é essencial realizar pesquisas e testes de campo para avaliar a eficácia e a viabilidade econômica do uso de bioestimulantes em plantios comerciais florestais antes de sua ampla adoção.

Uma alternativa a ser considerada na ciclagem de nutrientes é a integração de espécies leguminosas: possuem a capacidade de enfrentar desafios associados à escassez de N no solo (Figura 2).



Figura 2. Consórcio de culturas agrícolas com amendoim forrageiro. Fonte: Acervo UFV, 2024.

A colaboração entre leguminosas e gramíneas é notável devido à capacidade das leguminosas, com seu sistema radicular pivotante e profundo,

em acessar recursos menos disponíveis para as gramíneas, cujas raízes são mais superficiais. Além disso, destaca-se a transferência de N fixado pelas leguminosas e o período entre o processo de Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) e sua posterior disponibilidade para o sistema solo-planta (Teixeira; Santa-Cecília; Leite, 2018; Terra *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2021; Romanelli *et al.*, 2022).

2.1. Ciclo geoquímico

O ciclo geoquímico em plantios florestais se refere ao processo de fluxo e redistribuição de elementos químicos essenciais nos ecossistemas florestais. Este ciclo envolve diversas etapas, incluindo a absorção de nutrientes pelas plantas, a liberação desses nutrientes por meio da decomposição da matéria orgânica, a transferência de nutrientes entre diferentes compartimentos do ecossistema (como solo, biomassa vegetal e atmosfera), e a remoção de nutrientes por meio da colheita de biomassa (Teixeira; Santa-Cecília; Leite, 2018; Madureira, 2021).

A dinâmica do ciclo geoquímico em plantios florestais é influenciada por uma série de fatores, tais como as características do solo, o clima, as práticas de manejo florestal e a composição da vegetação. Por exemplo, em solos pobres em nutrientes, pode ser necessário fornecer fertilizantes para promover o crescimento saudável das árvores. Da mesma forma, o tipo de vegetação plantada e a sua taxa de crescimento afetam a demanda por nutrientes e a quantidade de biomassa produzida, o que, por sua vez, influencia a quantidade de nutrientes removidos do ecossistema durante a colheita (Cordeiro *et al.*, 2015; Barros, 2021; Madureira, 2021).

Todas as entradas e saídas de nutrientes do ecossistema no nível do sistema radicular são fundamentais para entender o ciclo de nutrientes. As principais entradas de nutrientes incluem: a) intemperismo; b) precipitação; c) fixação assimbiótica de N; e d) fertilização. Por outro lado, as saídas de nutrientes ocorrem principalmente por intermédio de: a) lixiviação; b) erosão; c) volatilização; d) oxidação (queima); e e) produtos exportados, como parte do ciclo geoquímico em florestas plantadas, representando a remoção de nutrientes

pelos colheitas, conhecido como "dreno florestal" (Reis; Barros, 1990; Teixeira; Santa-Cecília; Leite, 2018).

Durante a fase inicial, as plantas jovens demandam quantidades substanciais de nutrientes para o desenvolvimento de suas estruturas. Nesse estágio, ocorre uma absorção elevada de nutrientes, uma menor absorção de energia e uma maior decomposição da matéria orgânica. O crescimento é gradual. Devido a pouca cobertura vegetal, há uma maior infiltração de água e incidência de luz no solo, resultando em taxas aumentadas de evaporação, lixiviação e erosão (Ford, 1994; Cordeiro et al., 2015; Madureira, 2021).

É fundamental, especialmente em operações florestais comerciais, fornecer nutrientes por intermédio da adubação nesta fase inicial para garantir o crescimento adequado da floresta, uma vez que a biociclagem ainda não é eficiente (Barros, 2003; Barros, 2021). É fundamental destacar a vital importância da água nos ecossistemas naturais - desempenha um papel primordial na absorção e transporte de nutrientes pelas plantas, fundamentais para seu crescimento e desenvolvimento. Além disso, é essencial para uma série de funções vitais nos tecidos vegetais, incluindo o funcionamento adequado das células e moléculas essenciais (Araújo et al., 2020).

O entendimento do ciclo geoquímico em plantios florestais é essencial para o manejo sustentável desses ecossistemas, permitindo uma gestão adequada dos recursos naturais e a minimização dos impactos ambientais negativos. Isso inclui a execução de práticas de manejo que visem a conservação da água e da fertilidade do solo, a promoção da reciclagem de nutrientes e a redução do dreno florestal, ou seja, a remoção excessiva de nutrientes do ecossistema por intermédio da colheita (Cordeiro *et al.*, 2015; Teixeira; Santa-Cecília; Leite, 2018; Barros, 2021; Madureira, 2021).

2.2. Ciclo bioquímico

O ciclo bioquímico em espécies florestais descreve o fluxo e a transformação de elementos químicos essenciais nos organismos vegetais e nos ecossistemas florestais. Esse ciclo envolve várias etapas, desde a absorção de nutrientes pelas raízes das árvores até a sua incorporação nas biomoléculas das

plantas, como proteínas, carboidratos e lipídios. Além disso, inclui processos como a fotossíntese, a respiração, a transpiração e a decomposição da matéria orgânica (Cordeiro *et al.*, 2015; Silva; Sales, 2018; Madureira, 2021).

De acordo com esses mesmos autores, durante a fotossíntese as plantas absorvem dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera e água do solo, utilizando a energia solar para converter esses compostos em glicose e oxigênio. Parte dessa glicose é utilizada como fonte de energia para o metabolismo das plantas, enquanto o restante é armazenado nas células vegetais ou liberado no solo através de exsudatos radiculares.

Além da fotossíntese, as plantas também absorvem nutrientes essenciais, como N, P, K, Ca e Mg do solo por intermédio de suas raízes. Esses nutrientes são então transportados para cima através do xilema, onde são utilizados na síntese de biomoléculas ou armazenados em diferentes tecidos vegetais (Silva; Sales, 2018; Barros, 2021; Madureira, 2021).

À medida que as plantas crescem e se desenvolvem, partes delas, como folhas, galhos e raízes, morrem e se decompõem, liberando nutrientes de volta ao solo. Esses nutrientes podem ser então reabsorvidos por outras plantas ou por microrganismos do solo, fechando o ciclo bioquímico (Cordeiro *et al.*, 2015; Madureira, 2021).

Ou seja, este ciclo envolve a translocação de nutrientes dos tecidos mais velhos para aqueles mais jovens da planta. Por esse motivo, é importante para nutrientes de maior mobilidade dentro da planta, como N, P, K e Mg; porém, de menor significado para cálcio, enxofre e os micronutrientes, que têm retranslocação menor (Mengel; Kirkby, 1978; Madureira, 2021).

Esta é a razão pela qual há um grande acúmulo destes nutrientes na serapilheira, para os quais o ciclo biogeoquímico terá maior importância. Desta forma, sintomas de deficiência nas folhas velhas refletem elevada taxa de retranslocação, enquanto que sintomas de deficiências nas folhas novas indicam que o nutriente não está sendo retranslocado eficientemente para tecidos em formação (Reis; Barros, 1990; Silva; Sales, 2018; Barros, 2021).

A elevada ciclagem interna de nutrientes nas folhas é considerada um fator relevante, posto que durante a sua decomposição, podem ocorrer processos de

imobilização, principalmente de N. Também, há possibilidade de perdas por lixiviação e redução na disponibilidade de alguns nutrientes (por exemplo, passagem de P-lábil para não-lábil) devido à utilização direta para o crescimento de novos órgãos ou tecidos, constituindo-se em uma fonte constante de nutrientes no interior da planta (Reis; Barros, 1990; Cordeiro et al., 2015; Silva; Sales, 2018).

Dessa forma, a condução da floresta por meio de desbastes permite um melhor controle do ciclo de nutrientes, proporcionando menores alterações nos ciclos de energia e água. Os nutrientes mineralizados, produto dos desbastes, podem ser absorvidos pelas árvores remanescentes, reduzindo a possibilidade de perdas e exaustão do ecossistema. A ciclagem bioquímica de nutrientes nas árvores remanescentes deverá ser mais intensa, aumentando a eficiência de utilização dos nutrientes móveis nas plantas (Barros, 2000; Barros, 2021).

A taxa de imobilização do nutriente pode depender da idade da planta, conforme se pode observar na Figura 3. À medida que quantidades mais elevadas de nutrientes são necessárias para a produção de biomassa, o solo não sendo capaz de atender a esta demanda, aumenta a taxa de retranslocação desses elementos de maior mobilidade (Barros; Novais, 1990; Barros, 2021).

De acordo com Barros (2000), após o fechamento do dossel há um aumento na ciclagem interna (bioquímica) dos elementos móveis dentro da árvore. Concomitantemente, uma camada de serapilheira começa a ser formada, e a sua decomposição fornece uma quantidade crescente dos nutrientes requeridos pelas árvores. Na maturidade, o ciclo de nutrientes tende a um estado de equilíbrio, onde o retorno de nutrientes atende a maior parte da demanda (ciclo biogeoquímico).

O corte da floresta, durante o seu desenvolvimento (ponto B da Figura 3), não permite que seja estabelecido este ciclo de forma equilibrada e eficiente. Dessa forma, a redução no período entre as rotações, promoverá um aumento da demanda de nutrientes pelo povoamento, posto que este permanecerá constantemente num ritmo acelerado de crescimento, como exposto na Figura 3 (Barros; Novais, 1990).

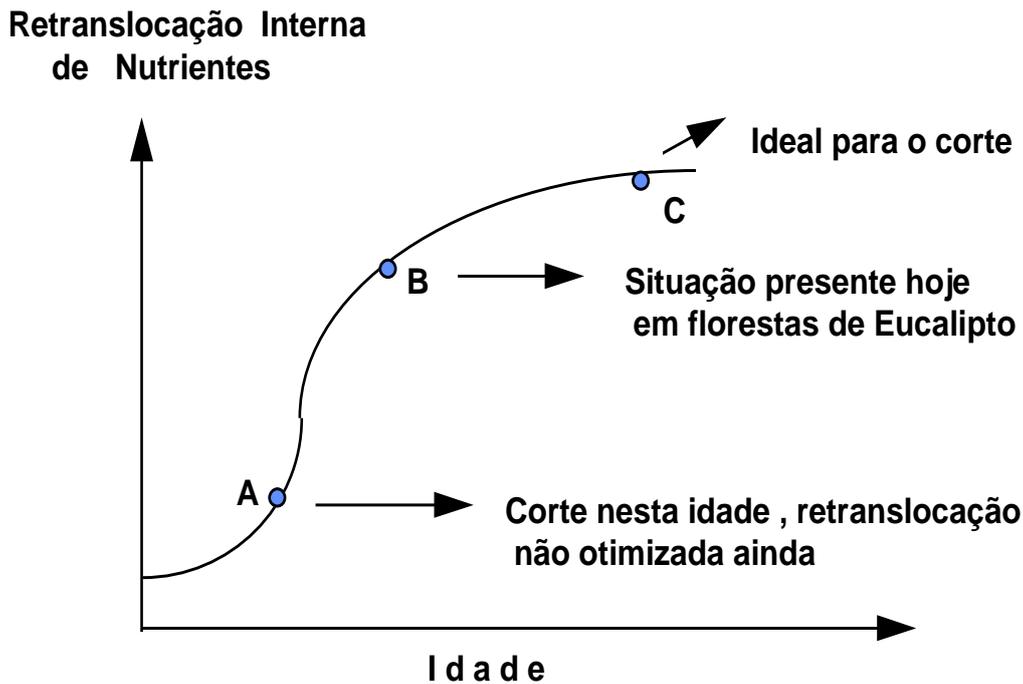


Figura 3. Representação esquemática dos ciclos de nutrientes em espécies florestais: Geoquímico (A), Bioquímico (B) e Biogeoquímico (C). Fonte: Barros; Novais, 1990.

A compreensão do ciclo bioquímico em espécies florestais é fundamental para o manejo sustentável de ecossistemas florestais, pois ajuda a entender como os nutrientes são reciclados e redistribuídos no ambiente. Isso é importante para garantir a saúde das florestas, a produtividade dos ecossistemas e a conservação da biodiversidade (Silva; Sales, 2018; Barros, 2021; Madureira, 2021).

2.3. Ciclo biogeoquímico

O ciclo biogeoquímico em florestas plantadas é um processo essencial para o funcionamento e a sustentabilidade desses ecossistemas. Envolve a circulação de nutrientes e elementos entre os componentes bióticos (como plantas, microrganismos do solo e fauna) e abióticos (como solo, água e atmosfera).

Nesta fase, o crescimento das árvores em florestas plantadas é estável, mas tende ao declínio. Isso se deve à grande deposição de matéria orgânica no

solo pela queda de resíduos vegetais. A transferência de nutrientes entre as plantas e o solo é dificultada devido ao menor fluxo de massa, já que a distância da raiz à copa é maior devido ao alongamento do tronco, demandando uma grande quantidade de energia. Além disso, há uma proporção significativa de folhas não fotossintetizantes, resultando em uma taxa de fotossíntese menor que a respiração (Ford, 1994; Araújo et al., 2020; Madureira, 2021).

O retorno de nutrientes por meio da serapilheira ("litter") é fundamental no ciclo biogeoquímico, especialmente em solos altamente intemperizados, nos quais a biomassa vegetal atua como principal reservatório de nutrientes. Portanto, é importante considerar que o acúmulo de material orgânico na cobertura do solo depende da taxa de decomposição e da ocorrência de distúrbios naturais (como fogo e ataques de insetos) ou artificiais (como remoção da serapilheira e práticas de cultivo), exigindo cuidados durante as práticas de manejo (Ferreira, 1981; Nogueira; Barros; Novais, 2016; Dailly, 2018; Adams; Lilleskov; McCulley, 2020).

Para orientar essas práticas, é fundamental conhecer a quantidade de material orgânico que entra no solo anualmente, o volume acumulado até uma determinada idade e o volume de resíduos gerados pela exploração florestal. Esses dados permitem avaliar a quantidade de nutrientes que podem retornar ao solo. Quando a taxa de decomposição é maior que a demanda das plantas, pode haver perda de nutrientes do ecossistema. No entanto, se o sistema estiver em equilíbrio, os nutrientes liberados durante o processo de decomposição podem ser reutilizados pelas plantas, promovendo a manutenção da produtividade do povoamento e a sustentabilidade do ambiente (Jordan; Kline, 1972; Dailly, 2018; Adams; Lilleskov; McCulley, 2020).

A Figura 4 oferece um esquema básico dos compartimentos e processos de transferência em uma análise sistemática dos ciclos de elementos químicos em um ecossistema florestal.

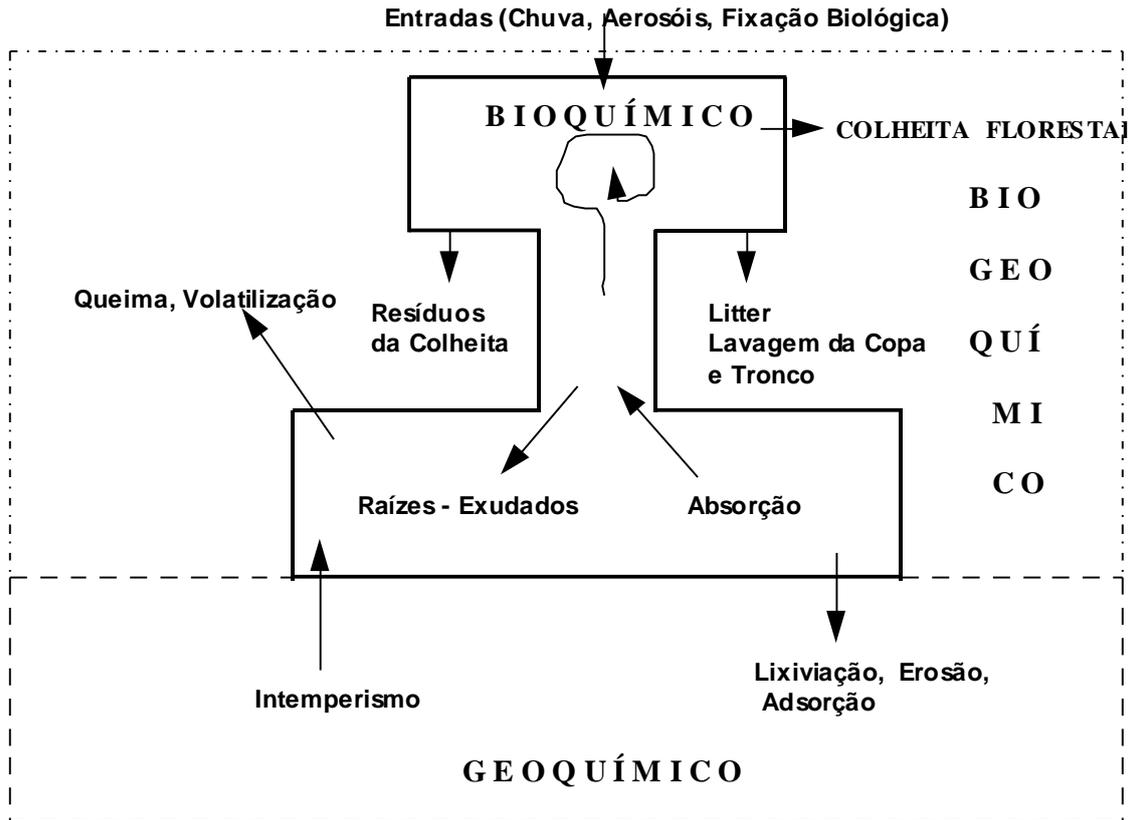


Figura 4. Ciclos de nutrientes em povoamentos florestais. Fonte: Whitmore, 1983.

Para orientar sobre a quantidade de nutrientes que podem retornar ao solo em florestas plantadas, é fundamental ter dados precisos sobre diversos aspectos. Isso inclui a quantidade de material orgânico que entra no solo anualmente, o volume de material acumulado em determinada idade e a quantidade de resíduos gerados pela exploração florestal. Essas informações são essenciais para entender o fluxo de nutrientes no ecossistema (Jordan; Kline, 1972; Teixeira; Santa-Cecília; Leite, 2018; Araújo et al., 2020; Barros, 2021).

De acordo com esses mesmos autores, quando a taxa de decomposição excede a demanda das plantas por nutrientes, podem ocorrer uma perda líquida de nutrientes do ecossistema. No entanto, se o sistema estiver equilibrado, os nutrientes liberados durante o processo de decomposição podem ser absorvidos pelas plantas, contribuindo para manter a produtividade do povoamento e a sustentabilidade do ambiente. Essa relação entre entrada e saída de nutrientes

é fundamental para o manejo adequado das florestas plantadas, visando garantir sua produtividade e resiliência em longo prazo.

3. Perspectivas para a mitigação dos impactos em florestas plantadas

Com o aumento da intensificação do uso das áreas destinadas aos plantios florestais, necessário para atender à crescente demanda por matéria-prima, há uma pressão crescente sobre o solo. Em muitos casos, essa pressão ultrapassa a capacidade de suporte e regeneração do solo, comprometendo a sustentabilidade do ecossistema. Portanto, torna-se essencial avaliar os efeitos da redução da idade de corte e, ou, do aumento do nível de utilização de componentes da árvore sobre a produtividade e o desenvolvimento sustentável da atividade de exploração florestal futura (Paula, 1997; Poggiani; Stape; Gonçalves, 1998; Ribeiro et al., 2019; Pimenta et al., 2022).

Essa avaliação, para esses mesmos autores, requer um conhecimento detalhado dos ciclos de nutrientes em diferentes estágios de desenvolvimento da planta. Esse conhecimento é fundamental para quantificar a reposição de nutrientes necessária para cada tipo de manejo, visando manter a sustentabilidade do sítio para futuras rotações de cultivo.

De acordo com Paula (1997), a retirada da casca do tronco e sua manutenção no sítio podem reduzir significativamente a remoção de nutrientes (Figura 5). Em famílias de meio-irmãos de *Eucalyptus camaldulensis*, a retirada da casca resultou em uma redução de 86,5% para o Ca, 23,3% para o P, 49,5% para o K e 67,8% para o Mg. Embora a casca represente apenas 14,9% do volume total do tronco, ela é responsável por uma parcela significativa do conteúdo de nutrientes, destacando sua importância para o ciclo de nutrientes e a sustentabilidade do ecossistema.

Para Paula (1997), os nutrientes P e K, por serem mais móveis na planta, geralmente estão presentes em maiores proporções em outros componentes, como folhas e galhos. Essas partes, que normalmente não são comercializáveis, permanecem no local e são reabsorvidas pelo processo de ciclagem de

nutrientes. Grespan (1997) afirma que a retirada da casca do tronco manteria cerca de 20% do K, 50% do Ca e 35% do Mg presentes na biomassa total.



Figura 5. Retirada da casca do tronco do eucalipto e sua manutenção no sítio.
Fonte: Emmanuel Mandzy, 2024.

Os resultados obtidos para as espécies de *Eucalyptus*, em três espaçamentos diferentes e em várias idades, destacam a importância de manter os resíduos da colheita florestal no campo. Isso resultaria em uma grande adição de matéria orgânica ao solo e, além disso, reduziria significativamente a exportação de nutrientes. Especialmente em situações onde essa operação fosse economicamente viável, a retirada da casca do tronco no talhão poderia ser promovida (Ladeira, 1999).

De acordo com esse mesmo autor, quando acrescentados à manta orgânica os componentes da árvore que normalmente permanecem no povoamento após a colheita, como galhos, folhas e raízes, eles representam, em média, 73% do N, 60% do P, 55% do K, 76% do Ca e 71% do Mg contidos na biomassa total (árvore + manta orgânica). Na hipótese da retirada da casca, os resíduos da colheita somados à manta orgânica representariam 82% do N, 81% do P, 83% do K, 92% do Ca e 87% do Mg. Portanto, a adoção de práticas de manejo voltadas para a conservação de nutrientes no sistema pode contribuir de maneira significativa para a manutenção da fertilidade dos solos cultivados e para a sustentabilidade do sítio.

Recentemente, tem-se observado que a ocorrência da deficiência de enxofre (S) nas áreas de cultivo florestal tem aumentado. Está diretamente relacionada à baixa fertilidade e ao elevado grau de intemperismo, ao uso de fertilizantes concentrados com ausência ou baixo teor de enxofre, e ao aumento da produtividade, juntamente com sucessivas rotações sem reposição adequada das quantidades exportadas (Alvarez *et al.*, 2007).

A avaliação e compreensão do equilíbrio entre os nutrientes são de suma importância para o correto manejo nutricional. Em relação ao macronutriente S, ele está diretamente relacionado com dois importantes macronutrientes, P e N. Em condições de deficiência de P e fornecimento de S em excesso, algumas vias metabólicas podem ser comprometidas, resultando em limitações no desenvolvimento do cultivo. No caso do N, a adição conjunta desses nutrientes pode resultar em uma interação sinérgica benéfica para o cultivo (Uchôa, 1999).

Ou seja, pode-se concluir que os nutrientes, bem como as suas interações, são o principal fator de produção na atividade de exploração florestal. Por esse motivo, as técnicas de manejo devem dedicar especial atenção ao capital natural e aos fluxos de nutrientes do ecossistema atual, garantindo não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também as produtividades presentes e futuras.

Nas florestas brasileiras, onde os solos são geralmente intemperizados e pobres em nutrientes, a manutenção da matéria orgânica do solo e, ou, da biomassa é uma condição básica para manter ou até mesmo aumentar a produtividade florestal. O manejo desses materiais deve priorizar o sincronismo entre a taxa de liberação dos nutrientes e a taxa de absorção ou demanda de nutrientes pela planta.

Diante do desafio mencionado, surgiram novas tecnologias destinadas a aperfeiçoar e otimizar a aplicação de fertilizantes, como os fertilizantes de liberação lenta ou controlada², que liberam os nutrientes de forma gradual no solo (Du; Zhou; Shaviv, 2006).

² É importante observar que os termos "liberação lenta" e "liberação controlada" não devem ser usados como sinônimos, pois há diferenças na tecnologia aplicada para controlar a liberação dos nutrientes. Os fertilizantes de liberação lenta não possuem revestimento, ao contrário dos fertilizantes de liberação controlada (Guelfi, 2017).

O uso desse tipo de fertilizante pode garantir um fornecimento gradativo de nutrientes para as plantas ao longo de um período maior em comparação com os adubos convencionais. Isso proporciona a otimização do uso do fertilizante, reduzindo a necessidade de reaplicação e resultando em economia nos custos de distribuição, além de diminuir o trabalho manual (Gun *et al.*, 2014).

Analisando o ecossistema de maneira holística, a sustentabilidade será garantida quando o balanço de nutrientes no ciclo geoquímico - entrada menos saída - for nulo ou positivo. Portanto, é necessário quantificar as entradas (intemperismo, adições atmosféricas, fixação biológica de nitrogênio e adubações) e as saídas (exportação de nutrientes via produto florestal, perdas via lixiviação, erosão e atmosfera) (Barros, 2003).

Considerando que a intensificação do uso do solo nos plantios florestais será cada vez maior, caso não sejam tomadas medidas adequadas de monitoramento, as áreas mal manejadas poderão gerar impactos e externalidades severos sobre os ciclos da água e dos nutrientes, bem como sobre o equilíbrio ecológico dos ecossistemas naturais adjacentes (Souza, 2015; 2024).

Nesse contexto, de acordo com esse mesmo autor, entre as pesquisas voltadas para o setor florestal, têm merecido destaque aquelas relacionadas à nutrição mineral associada às causas ambientais, particularmente as relativas ao manejo ecológico e à classificação por sítios. Essa preocupação tem aumentado diante das exigências da legislação ambiental e da sociedade, que deverão ser cada vez mais rigorosas, dadas as condições onde são implantados os maciços florestais. As grandes extensões de plantio, quando localizadas em solos extremamente frágeis em áreas anteriormente degradadas e com relevo acidentado, exigem cuidados rigorosos relacionados ao manejo, devendo ser uma prioridade.

Segundo Barros (2003), Teixeira, Santa-Cecília e Leite (2018), e Lourenço (2024), como ferramenta auxiliar para reduzir os riscos encontrados nessas condições, tem sido utilizada a Classificação de Terras ou Sítios Florestais. Considerando que a produção florestal resulta da combinação de diversos fatores (ambientais, fisiográficos, edáficos e bióticos) atuando em um determinado espaço, é essencial conhecer bem as características de cada local,

otimizando assim a produtividade e a eficiência da empresa, respeitando as limitações de cada área.

Dessa forma, resulta uma classificação de sítios ecologicamente distintos, o que permite aprimorar sua conservação e, inclusive, melhorar suas condições iniciais, recuperando áreas degradadas. Segundo Barros (2003), os benefícios dessa classificação incluem: a) planejamento do suprimento da fábrica, por meio da previsão do volume de produção de cada talhão; b) alocação de recursos de acordo com a capacidade do sítio; c) alocação de tecnologias, como realizar subsolagem em áreas específicas; d) seleção de clones para plantio, considerando sua homogeneidade e a interação genótipo versus ambiente; e) racionalização no uso de agroquímicos; e f) indicação do direcionamento e condução das pesquisas.

Essa classificação resulta em unidades menores de manejo, com condições similares, permitindo a redução de custos e a obtenção facilitada de indicadores de sustentabilidade, usando áreas próximas sob condições naturais como referência. Isso possibilita o aumento da produtividade do sítio, com a racionalização dos "inputs", como o uso de herbicidas, diminuindo a pressão sobre o meio ambiente.

Os métodos mais utilizados para essa classificação são: a) Índice de sítio ("Site-Index"); b) Método Solo-Sítio ("Soil-Site"); c) Classificação pedológica tradicional associada a outro método; e d) Nível de nutrientes. Essa classificação permite investir em talhões individuais, avaliando suas principais limitações (Barros, 2003).

Além disso, utilizando indicadores de sustentabilidade (físicos, químicos e biológicos), é possível verificar a eficiência do manejo, permitindo intervenções pontuais para evitar prejuízos e impactos ambientais futuros. Essa abordagem possibilita a criação de um índice de sustentabilidade único, indicando o manejo adequado e viabilizando procedimentos de conservação e recuperação.

Apesar da importância dessa classificação, a sustentabilidade da área também pode ser alcançada com a adoção de um eficiente plano de manejo que favoreça a ciclagem de nutrientes. Nesse sentido, a queda de resíduos que formarão a serapilheira é fundamental para equilibrar a matéria orgânica do solo

e sustentar esses ecossistemas, uma vez que é nesse compartimento que se concentram os microrganismos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e pela ciclagem de nutrientes (Correia; Andrade, 1999; Moreira; Simioni; Oliveira, 2017; Oliveira *et al.*, 2021).

De acordo com Smith e Paul (1990) e Oliveira *et al.*, 2021, a biomassa microbiana desempenha um papel central no ciclo do carbono, representando um reservatório considerável de nutrientes nos solos e sendo fundamental para o estudo da ciclagem de nutrientes em diferentes ecossistemas florestais. A rápida ciclagem da biomassa microbiana também pode fornecer fluxos significativos para a nutrição das plantas.

As práticas agroecológicas podem contribuir significativamente para promover a biomassa microbiana do solo e, conseqüentemente, influenciar positivamente o ciclo do carbono de várias maneiras. Cabe considerar que práticas agroecológicas e técnicas conservacionistas, apesar de serem abordagens distintas, mas relacionadas, promovem a sustentabilidade e a conservação dos recursos naturais na agropecuária e na gestão dos agroecossistemas.

4. Práticas agroecológicas e florestas plantadas

A agroecologia e as florestas plantadas são áreas que frequentemente se sobrepõem em questões de manejo sustentável da terra e conservação ambiental. Enquanto a agroecologia se concentra principalmente na produção agropecuária sustentável, as florestas plantadas têm um papel fundamental na conservação dos ecossistemas florestais e na produção de recursos madeireiros (Ribeiro *et al.*, 2024).

A agroecologia busca integrar os princípios ecológicos com práticas agropecuárias tradicionais e inovadoras, visando promover sistemas agropecuários resilientes, biodiversos e ambientalmente sustentáveis. Isso inclui o uso de técnicas como agroflorestas, rotação de culturas, compostagem, controle biológico de pragas e manejo integrado de doenças, entre outros. Essas práticas têm como objetivo reduzir a dependência de insumos externos, como

pesticidas e fertilizantes sintéticos, e promover a saúde do solo e a diversidade biológica (Altieri, 2018; Ribeiro *et al.*, 2024).

Por outro lado, as florestas plantadas são importantes para a conservação e recuperação de ecossistemas florestais, bem como para a produção de madeira, papel, celulose e outros produtos florestais. No entanto, é essencial que o manejo das florestas plantadas seja realizado de forma sustentável, levando em consideração a conservação da biodiversidade, a proteção do solo e da água, e o uso responsável dos recursos naturais (Xavier *et al.*, 2023).

Uma abordagem integrada entre agroecologia e manejo sustentável de florestas plantadas pode proporcionar benefícios significativos tanto para o meio ambiente quanto para as comunidades locais. Isso pode incluir a integração de sistemas agroflorestais, que combinam cultivos agrícolas com árvores de valor comercial ou ambiental, promovendo a diversidade de culturas, a conservação do solo e a geração de renda para os agricultores (Figueiredo *et al.*, 2022).

Além disso, a agroecologia pode oferecer percepções ecológicas e práticas de manejo que podem ser aplicadas no manejo das florestas plantadas, contribuindo para sistemas florestais mais resilientes e sustentáveis. Em última análise, a colaboração entre essas duas áreas pode ajudar a promover sistemas de uso da terra mais equilibrados e harmoniosos, que atendam às necessidades dos agroecossistemas, das pessoas e dos biomas em longo prazo (Altieri, 2018; Souza, 2021; Xavier *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2024).

Cabe considerar, que enquanto as práticas agroecológicas se concentram na criação de sistemas agrícolas sustentáveis baseados em princípios ecológicos mais amplos, as técnicas conservacionistas são medidas específicas para conservar e proteger recursos naturais, como solo e água, em sistemas agropecuários e de uso da terra (Souza, 2022; 2022b; 2022c; 2023).

5. Considerações

As atividades humanas frequentemente geram impactos e externalidades negativos no meio ambiente, muitas vezes inevitável devido à necessidade de produção de bens essenciais para nosso dia a dia. No entanto, é fundamental

que todas as ações humanas sejam planejadas de forma a minimizar esses danos, visando a sustentabilidade do ecossistema.

Diversas práticas, além das florestas plantadas, podem resultar na degradação dos solos, como o revolvimento excessivo do solo em atividades agrícolas, sem a devida manutenção da cobertura, expondo-o às intempéries climáticas. Essas práticas, se mantidas por longos períodos, podem resultar em danos graves, incluindo a perda da camada fértil do solo.

Os principais processos de degradação incluem a erosão do solo, a perda de biodiversidade e o surgimento de pragas e doenças. Para combater esses problemas, é essencial adotar práticas de manejo sustentável das florestas, como a diversificação de espécies, a execução de práticas silviculturais responsáveis e o monitoramento e controle de pragas.

O manejo eficaz de florestas plantadas requer uma abordagem integrada que leve em consideração os processos de degradação e os princípios da sustentabilidade. Ao adotar práticas responsáveis de manejo e promover a diversidade ecológica, podem-se garantir a qualidade e a produtividade desses importantes ecossistemas para as gerações futuras.

Portanto, é fundamental que os responsáveis por essas atividades se conscientizem sobre os danos ao meio ambiente e adotem práticas conservacionistas de produção. Além disso, é essencial investir em pesquisa para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e abrangentes, visando a recuperação não apenas de locais específicos, mas de regiões inteiras, em busca da recuperação ambiental completa e da preservação das comunidades locais.

6. Referências

ADAMS, M. B.; LILLESKOV, E. A.; MCCULLEY, R. L. (Eds.). **Biogeochemistry of Forests**. CRC Press. 2020.

ALMEIDA, M. R.; GUERRA, A. C. M.; BISPO, V. dos S. C.; TRUGILHO, G. A.; XAVIER, S. A. B.; NASCIMENTO, L. M. Q. do; AZEVEDO, P. L.; SOUZA, M. N. Produção de madeira, sequestro de carbono, SAFs e fomento florestal. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. VII. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2023. p. 150-182. ISBN: 978-65-84548-18-3. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-18-3.c5>

ALTIERI, M. A. **Agroecology**: the science of sustainable agriculture. By Miguel A. Altieri - 2nd ed. p. cm. Includes bibliographical references and index. ISBN 0-8133-1717-7 / ISBN 0-8133-1718-5 (pbk.). London, New York: Taylor & Francis Group Boca Raton, 2018. 448 p.

ALVAREZ, V. H. *et al.* Nutrição e fertilidade do solo. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (Eds.). **Fertilidade do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007.

ARAÚJO, E. D.; ALVINO, F. C. G.; FERREIRA, L. B.; CUNHA, F. F. da. Predictive models of water application and distribution efficiency in conventional sprinkling. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 1, p. 24-33, 2020.

BARROS, A. P. V. **Produção de madeira e eficiência de uso de nutrientes modelados conforme a classe de produtividade de povoamentos clonais de eucalipto**. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Viçosa, 2021.

BARROS, N. F. **Notas de aula de SOL 645**: Solos de Ecossistemas Florestais. Departamento de Solos. Universidade Federal de Viçosa, MG. 2003.

BARROS, N. F. **Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical**. Viçosa: UFV, 2000, 124p. (Relatório da CAPES).

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. Algumas relações solo-espécie de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Eds.) **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Editora Folha de Viçosa, 1990. p.1-24.

BENDITO, B. C.; SOUZA, P. A. de; PEREIRA, M. A.; GONÇALVES, D. S. Diagnóstico ambiental e proposição de uso de SAF para área de pastagem degradada. **Geoambiente On-Line**: Revista Eletrônica do Curso de Geografia - UFG/REJ, Jataí, Go, v. 29, p. 148-163, 20 dez. 2017. Disponível em: <http://revistas.ufg.br/index.php/geoambiente/index>. Acesso em: 14 nov. 2022.

BINKLEY, Dan et al. Explaining growth of individual trees: Light interception and efficiency of light use by Eucalyptus at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1704–1713, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.037>>.

BINKLEY, Dan et al. Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 5–13, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.002>>

BURAK, D. L.; MENDONÇA, E. S.; PEÇANHA, A. L.; VALENTIM, S. B.; PRAÇA, N. M. P.; JÚNIOR, J. L. F.; THIENGO, C. C.; OLIVEIRA, D. M.; ROCHA, L. O.; OLIVARES, F. L. Insumos biológicos na recuperação de pastagens degradadas da região sul do Estado do Espírito Santo. **Sistemas integrados de produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias**. 1.ed., vol. 1, p. 304-326, 2021.

CARON, V. C.; GRAÇAS, J. P.; CASTRO, P. R. C. **Série produtor rural**: condicionadores do solo: ácidos húmicos e fúlvicos. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2015. n. 58. 46 p.

CASTRO, F. S. **Zoneamento agroclimático para a cultura do Pinus no Estado do Espírito Santo**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, p. 101. 2008.

CORDEIRO, I. M. C. C.; BARROS, P. L. C. de.; LAMEIRA, O. A.; GAZEL FILHO, A. B. Avaliação de plantios de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) de diferentes idades e sistemas de cultivo no município de Aurora do Pará - PA (Brasil). **Ciência Florestal**, v. 25, n. 3, p. 679-687, 2015. Doi: <https://doi.org/10.5902/1980509819618>.

CORREIA, M. E. F.; ANDRADE, A. G. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO F. A. O. (Org.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 197-226.

DAILLY, H. Nutrient Cycling in Agroforestry Systems: A Review. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 365-381, 2018.

DU, C.-W.; ZHOU, J.-M.; SHAVIV, A. Release Characteristics of Nutrients from Polymer-coated Compound Controlled Release Fertilizers. **Journal of Environmental Polymer Degradation**, v. 14, n. 3, p. 223-230, 2006. Doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10924-006-0025-4>.

ELLI, Elvis Felipe et al. Assessing the growth gaps of Eucalyptus plantations in Brazil – Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, n. February, p. 117464, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117464>>.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020**. 1. ed. Rome, Italy: FAO - Food and Agriculture Organization of United Nations, 2020. Disponível em: <<https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca9825en>>.

FERREIRA, E. P. de B.; STONE, L. F.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 48, n. 1, p. 22-31, jan. 2017.

FERREIRA, M. B.; GAVILANES, M. L. Reintrodução de essências nativas na recomposição das formações naturais. **Informe Agropecuário**, v. 7, n. 80, p. 50-58, 1981.

FIGUEIREDO, J. S. M.; VARDIERO, L. G. G.; XAVIER, S. A. B.; SILVA, M. A. B. da; ARAUJO, O. P.; PEIXOTO, P. M. C.; PERON, I. B.; OLIVEIRA, F. S. de; SOUZA, M. N. Agroecologia como meio para a sustentabilidade da agricultura familiar. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. IV. – Canoas, RS: Mérida Publishers. p. 99-126. 2022. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-10-7.c3>

FORD, E. D., The dynamics of plantation growth. In: BOWER, G.D.; NAMBIAR, E.K.S. **Nutrition of plantation Forest**. London: Academic Press, 1994. p. 234-257.

FORTALEZA, A. P.; FILHO, J. J. P. do. N.; CERETTA, R. P. da. S.; BARROS, D. de. S.; SILVA, S. S. da. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1436-1451, 2019.

GRESPLAN, S. L. **Produção e eficiência nutricional de clones de eucalipto no norte do Espírito Santo e suas relações com características do solo**. 1997, 81f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GUELFÍ, D. R. Tecnologias de fertilizantes de liberação lenta e controlada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 11, p. 757-762, 2017.

GUN, M.; TAVMAN, S.; GÜNER, M. Slow-release fertilizers: a review. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 3, n. 5, p. 481-494, 2014.

HAKAMADA, Rodrigo Eiji et al. Influence of stand density on growth and water use efficiency in Eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 466, n. January, 2020

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual IBÁ - 2023**. 2023.

JORDAN, C. F.; KLINE, J. R. Mineral cycling: some basic concepts and their application in tropical rain forest. **Ann. Ver. Ecol. Systematic**, v. 3, p. 33-50, 1972.

LADEIRA, B. C. **Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de *Eucalyptus* spp., sob três espaçamentos, em uma sequência de idades**. 1999, 132f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

LOURENÇO, R. D-S. **Irrigação e fertirrigação em eucalipto: análise do desempenho e identificação de fatores limitantes ao crescimento**. Universidade Federal de Viçosa, abril de 2024. Tese (Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa). 2024. 97 p.

MADUREIRA, G. C. **Eficiência nutricional, ciclagem bioquímica e modelagem do crescimento de árvores de *Tectona Grandis***. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, 2021.

MALLMANN, V.; ARAGÃO, R. F. R.; PESTANA, V. J.; BARTIERES, E. M. M.; ARAGÃO, L. W. W. R.. Sistemas agroflorestais e agroecologia, uma alternativa para recuperação de áreas degradadas. **Revista Online de Extensão e Cultura**: Realização, Dourados, v. 5, n. 9, p. 66-72, 20 ago. 2018.

MARTINS, M. C.; SOUZA, M. N. Uma análise das variáveis do desenvolvimento rural sustentável no uso da Integração Lavoura Pecuária e Floresta (ILPF) em municípios da Zona da Mata de Minas Gerais. Multifuncionalidades sustentáveis no campo: **Agricultura, pecuária e florestas**, v. 5, p. 10-15, 2013. Disponível em: <http://www.simbras-as.com.br>.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principle of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute, 1978, 593 p.

MOREIRA, J. M. M. A. P., SIMIONI, F. J.; OLIVEIRA, E. B. de. Importância e desempenho das florestas plantadas no contexto do agronegócio brasileiro. **Floresta**, v. 47, n. 1, p. 85-94, 2017.

NARDINI, Claiton et al. Biomass and radiation use efficiency in Eucalyptus plantations as affected by spacing of planting. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 48, n. 128, p. 1–14, 2021

NASCIMENTO, P. de O.; SOUZA, M. N. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e a recuperação de pastagens degradadas. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. IV. – Canoas, RS: Mérida Publishers. p. 152-171. 2022. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-10-7.c5>

NOGUEIRA, D. A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Eds.). **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2016.

NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Nutrição mineral do eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Eds.). **Relação Solo-Eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p. 25-98.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 434 p.

OLIVEIRA, F. S. DE; DESTEFANI, J. D.; , TAVARES, L. R.; PÁSCHOA, J. C. V. DA; CRESPO, A. M.; ARAUJO, O. P.; PEIXOTO, P. M. C.; SIQUEIRA, C. B.; CORTAT, L. H.; SOUZA, M. N. Microrganismos simbiotes: fixação biológica de nitrogênio e recuperação de pastagens degradadas. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. II. Canoas: Mérida Publishers Ltda. 2021. p. 243-275. <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-994457-2-9.c6>

PAULA, R. C. Exportação de nutrientes por famílias de meio-irmãos de *Eucalyptus camaldulensis*. In: CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS, 1997, Salvador. **Proceedings...** Colombo: EMBRAPA - CNPF/ DEHNH/ IUFRO, vol.1, 1997. p.200 -204.

PIMENTA, J. M. A.; SANTOS, A. L. R. dos; VERA, D. E.; DEKNES, L. B.; WOICIECHOWSKI, T. Diagnóstico ambiental e recomendações para recuperação de área degradada em Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Principia**, João Pessoa, v. 59, n. 2, p. 445-466, 2022.

POGGIANI, F.; STAPE, J. L.; GONÇALVES, J. L. M. Indicadores de sustentabilidade das plantações florestais. **Série técnica IPEF**, v. 12, n. 31, 1998. p. 33-44.

REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Ciclagem de nutrientes em plantios de Eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Eds.). **Relação Solo-Eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p. 265-301.

RENGASAMY, P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. **Functional Plant Biology**, v. 37, n. 7, p. 613-620, 2010.

RIBEIRO, R. A. V.; MANSUR, G. M. R.; CÓ, W. L. O.; GOLÇALVES, M. M.; FIGUEIREDO, J. S. M.; COSTA, W. M. da; SOUZA, M. N. Agroecologia e sua importância no contexto da sustentabilidade. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental**. Vol. I. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2024. p. 98-129. ISBN: 978-65-84548-22-0. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-22-0.c3>

RIBEIRO, V. M.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; TEIXEIRA, W. G. Growth and nutrient accumulation of native tree species in reforestation areas with different soil tillage practices. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, 2019. DOI: 10.1590/2179-8087.043018.

ROMANELLI, J. P.; MELI, P.; SANTOS, J. P. B.; JACOB, I. N.; SOUZA, L. R. de.; RODRIGUES, A. V.; TREVISAN, D. P.; HUANG, C.; ALMEIDA, D. R.; SILVA, L. G. M.; ASSAD, M. L. R. C. L.; CADOTTE, M. W.; RODRIGUES, R. R. Biodiversity responses to restoration across the Brazilian Atlantic Forest. **Science of The Total Environment**, p. 153403, 2022.

SANTANA, P. H. L.; THIENGO, C. C.; BURAK, D. L.; OLIVEIRA, D. M. de; MENDONÇA, E. de S.. Adoção de biotecnologias para revegetação mais eficiente por feijão-de-porco e crotalária em rejeito de minério de ferro. **Colloquium Agrariae**, [S. L.], v. 16, n. 5, p. 1-13, 2020.

SILVA, A. de A. *et al.* Estoques de carbono e nitrogênio no Sistema Silvopastoril com Núcleos: a nucleação aplicada viabilizando a pecuária de baixo carbono. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 9, n. 10, p. 1-30, 26 set. 2020. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8589>.

SILVA, A. R.; SALES, A. Crescimento e produção de paricá em diferentes idades e sistemas de cultivo. **Advances in Forestry Science**, v.5, n.1, p.231-235, 2018.

SMITH, J. L.; PAUL, E. A. The significance of soil microbial biomass estimations. In: BOLLAG, J. M.; STOTZKY, G. (Eds.). **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Decker, v. 6, 1990. p. 357-396.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em gestão ambiental**. Vol. I. Canoas, RS: Mérida Publishers, 2024. 325 p. ISBN: 978-65-84548-22-0. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-22-0>.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. III. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2022c. 347 p. ISBN: 978-65-84548-04-6. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-04-6>.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. IV. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2022b. 304 p. ISBN: 978-65-84548-10-7. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-10-7>.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. III. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2022. 347 p. ISBN: 978-65-84548-04-6. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-04-6>.

SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. V. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2023. 348 p. ISBN: 978-65-84548-12-1. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-12-1>.

SOUZA, M. N. **Degradação antrópica e procedimentos de recuperação ambiental**. Balti, Moldova, Europe: Novas Edições Acadêmicas, 2018, 376 p.

SOUZA, M. N. **Mudanças no uso do solo e da água e a gestão dos recursos naturais**. Frankfurt, Alemanha: Novas Edições Acadêmicas, 2015. 376 p.

SOUZA, M. N. Recuperação ambiental ou recuperação de áreas degradadas: conceitos e procedimentos. p. 11-57. In: SOUZA, M. N. **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. VOL. I. CANOAS: Mérida Publishers, 2021.133 p.

TEIXEIRA, W. G.; SANTA-CECÍLIA, L. V. C.; LEITE, F. P. Soil management and plant nutrition strategies for sustainable development of forest plantations. In: **Soil Management and Climate Change**, p. 295-312, 2018.

TERRA, A. B. C.; FLORENTINO, L. A.; REZENDE, A. V. de; SILVA, N. C. D. e. Leguminosas forrageiras na recuperação de pastagens no Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, [S. L.], v. 42, n. 2, p. 305-313, 2019.

UCHÔA, S. C. P. **Dinâmica de formas lábeis e não lábeis de enxofre no solo**. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

WHITMORE, T. C. Secondary succession from seed in tropical rain forests. In: **Forestry abstracts**, Oxford, v. 44, n. 12, p. 767-79, 1983.

XAVIER; S. A. B.; MOREIRA; T. B. R.; CASSA, N.; CRESPO, A. M.; LOUBACK, G. C.; PERON; I. B.; VARDIERO, L. G. G.; SOUZA, M. N. Agroecologia aplicada aos procedimentos de recuperação de áreas degradadas. In: SOUZA, M. N. (Org.) **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**. Vol. V. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2023. 348 p. ISBN: 978-65-84548-12-1. DOI: <https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-12-1.c3>