

## **Bioeconomia na Amazônia: importância da matéria orgânica do solo para a manutenção dos sistemas produtivos**

**Bioeconomy in the Amazon: importance of soil organic matter for the maintenance of production systems**

**Bioeconomía en la Amazonía: importancia de la materia orgánica del suelo para el mantenimiento de los sistemas productivos**

Recebido: 24/01/2023 | Revisado: 07/02/2023 | Aceitado: 08/02/2023 | Publicado: 13/02/2023

**Julio Cesar Vieira Frare**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4339-5554>

Instituto Federal do Pará, Brasil

E-mail: [julio.frare@ifpa.edu.br](mailto:julio.frare@ifpa.edu.br)

**Gabriel Caixeta Martins**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7271-0699>

Instituto Tecnológico Vale, Brasil

E-mail: [gabriel.martins@pq.itv.org](mailto:gabriel.martins@pq.itv.org)

**Ludmila de Freitas**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9976-3387>

Instituto Federal de Rondônia, Brasil

E-mail: [ludmila.freitas@ifro.edu.br](mailto:ludmila.freitas@ifro.edu.br)

**Ivanildo Amorim de Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2299-3229>

Instituto Federal de Rondônia, Brasil

E-mail: [ivanildo.oliveira@ifro.edu.br](mailto:ivanildo.oliveira@ifro.edu.br)

**Silvio Ramos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5909-8418>

Instituto Tecnológico Vale, Brasil

E-mail: [silvio.ramos@itv.org](mailto:silvio.ramos@itv.org)

### **Resumo**

Na Amazônia, as condições naturais de baixa fertilidade e elevada acidez dos solos impõem grandes desafios para a manutenção da produção agrícola. Nessas circunstâncias, a matéria orgânica é essencial para a qualidade dos solos, influenciando seus atributos físicos, químicos e biológicos. O aporte constante de biomassa em uma floresta promove a ciclagem de nutrientes, disponibilizando, em parte, os nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas. O mesmo não ocorre na agropecuária, em que a remoção da cobertura vegetal e a falta de manejo adequado afetam consideravelmente a sustentabilidade dos sistemas de produção. O objetivo deste trabalho foi, portanto, ressaltar a importância da matéria orgânica para a conservação dos solos da Amazônia, destacando os impactos do desmatamento sobre a qualidade do solo e aspectos relevantes para a sua recuperação. Para isso, foram consultados artigos científicos indexados em bases de dados online nos últimos quinze anos, além de livros, dissertações, teses e publicações técnicas. A implantação de sistemas agroflorestais destaca-se como opção para a recuperação de áreas degradadas na Amazônia, ainda que existam diversos desafios para o seu uso, como a falta de informações acerca de quais espécies utilizar em cada situação. A recuperação de solos degradados exige projetos específicos que levem em conta, entre outros aspectos, o uso de espécies-chave para garantir o êxito deste processo, sendo necessários estudos que avaliem o desempenho das espécies melhor adaptadas às diversas condições de clima e solo das áreas a serem recuperadas.

**Palavras-chave:** Agricultura sustentável; Carbono orgânico; Corte-e-queima.

### **Abstract**

In the Amazon, the natural conditions of low fertility and high soil acidity pose major challenges for maintaining agricultural production. Under these circumstances, organic matter is essential for soil quality, influencing its physical, chemical and biological attributes. The constant supply of biomass in a forest promotes nutrient cycling, making available, in part, the nutrients needed for plant development. The same does not occur in the agricultural areas, where the removal of vegetation cover and the lack of proper management considerably affect the sustainability of the production systems. The objective of this work was, therefore, to highlight the importance of the organic matter for the conservation of soils in the Amazon, discussing the impacts of deforestation on soil quality and relevant

aspects for its recovery. In order to do that, scientific articles indexed in online databases published in the last fifteen years were consulted, as well as books, dissertations, theses and technical publications. The implementation of agroforestry systems stands out as an option for the recovery of degraded areas in the Amazon, although there are several challenges for its use, such as the lack of information about which species to use in each situation. The recovery of degraded soils requires specific projects that take into account, among other aspects, the use of key species to ensure the success of this process, requiring studies to assess the performance of species best adapted to the different climate and soil conditions of the areas to be recovered.

**Keywords:** Sustainable agriculture; Organic carbon; Slash-and-burn.

### Resumen

En la Amazonía, las condiciones naturales de baja fertilidad y alta acidez del suelo plantean grandes desafíos para mantener la producción agrícola. En estas circunstancias, la materia orgánica es fundamental para la calidad del suelo, influyendo en sus atributos físicos, químicos y biológicos. El suministro constante de biomasa en un bosque promueve el ciclo de nutrientes, poniendo a disposición, en parte, los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas. No ocurre lo mismo en la agricultura, donde la remoción de la cubierta vegetal y la falta de un manejo adecuado afectan considerablemente la sustentabilidad de los sistemas productivos. El objetivo de este trabajo fue, por lo tanto, resaltar la importancia de la materia orgánica para la conservación de los suelos en la Amazonía, destacando los impactos de la deforestación en la calidad del suelo y aspectos relevantes para su recuperación. Para esto se consultaron artículos científicos indexados en bases de datos en línea en los últimos quince años, así como libros, disertaciones, tesis y publicaciones técnicas. La implementación de sistemas agroforestales se destaca como una opción para la recuperación de áreas degradadas en la Amazonía, aunque existen varios desafíos para su aprovechamiento, como la falta de información sobre qué especies utilizar en cada situación. La recuperación de suelos degradados requiere de proyectos específicos que tengan en cuenta, entre otros aspectos, el uso de especies clave para asegurar el éxito de este proceso, requiriendo estudios para evaluar el comportamiento de las especies mejor adaptadas a las diferentes condiciones climáticas y edáficas de las zonas a recuperar.

**Palabras clave:** Agricultura sostenible; Carbono orgánico; Tala y quema.

## 1. Introdução

Os ecossistemas terrestres estão em constante processo de alteração devido à ocupação humana (Sathish et al. 2022, Ribeiro et al. 2022). A intensificação de práticas agrícolas não sustentáveis, por exemplo, leva a uma acelerada degradação dos recursos naturais do planeta (Muchane et al., 2020). Aproximadamente 25% da área agricultável do mundo sofreu um declínio na qualidade e produtividade entre os anos 1990 e 2014, em função da diminuição da fertilidade do solo (Bringezu et al., 2014). Cerca de 33% dos solos do mundo encontram-se degradados ou em processo de degradação, principalmente devido ao desmatamento e consequentes processos de erosão, compactação e perda da matéria orgânica do solo (Food and Agriculture Organization [FAO], 2015a). Durante as décadas de 80 e 90, a área agrícola nas regiões tropicais do planeta aumentou 100 milhões de hectares, sendo mais da metade à custa da derrubada de floresta nativa (Gibbs et al., 2010). A conversão da vegetação natural em áreas agrícolas pode ocasionar mudanças significativas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, como desestruturação e compactação (Wang et al., 2012).

A Floresta Amazônica ocupa 40% da área total da América do Sul, sendo considerada a maior floresta tropical do mundo (Packham, 2015). No Brasil, a Amazônia estende-se por quase metade do território nacional (49,29%), sendo considerado o maior bioma do país, com aproximadamente 419,6 milhões de hectares (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2019). O bioma amazônico contém 40% das florestas tropicais do planeta e desempenha papel fundamental na regulação do clima e na manutenção dos ciclos biogeoquímicos (Almeida et al., 2013). Suas aproximadamente 390 bilhões de árvores, de cerca de 16.000 espécies diferentes, ajudam a estocar entre 110 e 154 bilhões de toneladas de carbono e abrigam cerca de 10% de todas as espécies conhecidas do planeta (Packham, 2015).

Embora a Amazônia possua diversos recursos em abundância, as formas de exploração destes recursos quase nunca foram sustentáveis (Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade do Estado do Pará [IDEFLOR-Bio], 2021), o que ameaça a biodiversidade da floresta (Jardim et al., 2007). A maior demanda global por produtos madeireiros e não

madeireiros oriundos das florestas tropicais tem contribuído, em grande parte, para o desmatamento nessas regiões (FAO, 2015b; Shearman et al., 2012). De 1988 até 2021, 20,6% da área total da Amazônia Legal tinha sido desmatada (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial [INPE], 2022). Segundo estudo de 2008, aproximadamente 20% das áreas desmatadas da região encontravam-se abandonadas ou subutilizadas, apresentando algum grau de degradação (Almeida, 2008).

Geralmente, o desmatamento e a conversão da floresta tropical em área de cultivo resultam em redução do estoque de carbono no solo (Arévalo-Gardini et al., 2015; Bonilla-Bedoya et al., 2017), alterando a qualidade e a quantidade de matéria orgânica, e, conseqüentemente, a atividade da biomassa microbiana do solo (Moreira & Malavolta, 2004). Alterações físicas do solo também impactam o processo de decomposição microbiológica, acelerando as taxas de decomposição da matéria orgânica do solo exposto, em consequência da ruptura de seus macroagregados (Silva-Júnior, 2007). Este distúrbio pode levar a uma interrupção dos processos biológicos responsáveis pela ciclagem de nutrientes (Lima et al., 2011), reduzindo os teores de nutrientes como nitrogênio e fósforo, principalmente em solos altamente intemperizados (Reed et al., 2011).

A carência de conhecimento técnico e difusão de informações relacionadas ao manejo de solos e de cultivos tem favorecido o abandono de áreas agrícolas na Amazônia após curto período de tempo, perpetuando a prática de corte-e-queima, e conseqüentemente, a abertura de novas áreas para plantio (Luizão et al., 2009). Atualmente, 90% da cobertura florestal original do nordeste paraense foram convertidos em vegetação secundária (IDEFLOR-Bio, 2021). No sudeste do estado, na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, a conversão da cobertura florestal em pastagens de 1973 a 2013 levou a modificações significativas no ciclo hidroclimatológico da região, evidenciando condições ambientais mais secas, com aumento da temperatura do ar e diminuição na umidade relativa (Souza-Filho et al., 2016).

Práticas inadequadas de preparo e manejo do solo estão entre as principais causas de degradação de solos na Amazônia (Silva-Júnior, 2007). Os solos tropicais geralmente são mais pobres em nutrientes do que os solos temperados, mas possuem uma vida microbiana muito mais intensa, o que contribui para a decomposição da matéria orgânica e disponibilização de nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas (Primavesi, 2016). Por este motivo, a adoção de técnicas de manejo que objetivam manter a cobertura do solo e aumentar o aporte de resíduos vegetais no sistema pode ser uma estratégia para manter a fertilidade dos solos e melhorar a produtividade agrícola na região (Sousa et al., 2009).

A agricultura de corte-e-queima, amplamente praticada na Amazônia brasileira, gera conseqüências ambientais negativas, com destaque para o desmatamento e a erosão dos solos, associadas ao uso do fogo (Moreira et al., 2009; Tremblay et al., 2015). A queima da cobertura florestal elimina a matéria orgânica, deixando o solo exposto a chuvas intensas que podem levar à compactação dos solos e reduzir a taxa de infiltração de água, facilitando o processo de erosão (Sá et al., 2007). A adoção de sistemas conservacionistas tem apresentado potencial para reverter o processo de degradação química, física e biológica dos solos agrícolas nas regiões tropicais (Arévalo-Gardini et al., 2015; Ronquim, 2020). Na Amazônia, todavia, o uso de práticas mais sustentáveis de produção agrícola, como os sistemas agroflorestais, ainda é incipiente, sendo necessário divulgar e testar modelos específicos para a região (Luizão et al., 2009).

Diante deste cenário, é grande o desafio de manejar as áreas já desmatadas, combinando desenvolvimento econômico com sustentabilidade ambiental (Brienza-Júnior et al., 2009; Lagneaux et al., 2021). Portanto, este trabalho tem por objetivo discutir a importância da preservação da matéria orgânica do solo e da recuperação de áreas degradadas, visando o uso mais sustentável dos solos na Amazônia.

## 2. Metodologia

A metodologia de pesquisa utilizada foi a revisão bibliográfica narrativa. A partir de fontes acadêmicas e científicas, procurou-se atualizar os leitores quanto ao objeto deste estudo: a importância da matéria orgânica do solo para a produção

sustentável na Amazônia. A revisão narrativa permite compreender melhor as lacunas de conhecimento existentes sobre determinado conteúdo, apontando para quais áreas específicas deverão ser direcionadas as futuras pesquisas sobre este assunto (Corrêa et al., 2013). Desta forma, a metodologia utilizada permitiu trazer narrativas conceituais e explicativas acerca do tema escolhido, possibilitando também a sua contextualização histórica. Por exemplo, a partir da definição do que é a qualidade do solo pôde-se discutir o histórico de uso da terra na Amazônia e como as práticas utilizadas têm contribuído para a degradação dos solos da região. O artigo também traz um componente crítico ao trazer o posicionamento dos autores acerca do conteúdo abordado por outros autores a partir da análise de conteúdo das obras selecionadas, conforme proposto por Severino (2016).

Esta revisão bibliográfica foi elaborada no ano de 2022, a partir de artigos científicos indexados na base de dados da Web of Science, portal CAPES, além de consultas a livros, dissertações, teses e publicações técnicas. A seleção dos artigos foi realizada com base nos seguintes critérios de inclusão: o artigo deveria ser original, escrito em idioma de língua portuguesa ou inglesa, acessível na íntegra em formato eletrônico e publicado nos últimos quinze anos, ou seja, entre 2007 e 2022. Os critérios de exclusão adotados foram: artigos publicados em outros idiomas, artigos de acesso restrito ou que não apresentassem resumo completo.

A pesquisa na base de dados foi realizada combinando-se as seguintes palavras-chave: “tropical”, “agroforestry” e “organic matter”, tendo a palavra “tropical” sido substituída por “Amazon” em uma segunda busca. Após aplicação dos filtros utilizados para atender aos critérios estabelecidos, para a busca “tropical”, “organic matter” e “agroforestry” foram encontradas 208 obras enquanto para a combinação “Amazon”, “organic matter” e “agroforestry” foram encontradas 36 obras publicadas na plataforma. Após leitura dos títulos dessas obras, foram excluídas aquelas cujo tema extrapolava o objeto desta pesquisa, a exemplo de artigos que tratavam de agroflorestas em áreas urbanas, análises de viabilidade econômica dos sistemas, diversidade genética de seus componentes, sistemas agrossilvopastoris, estudo de populações microbianas, comunidade de insetos e macrofauna dos solos, serviços ambientais como polinização, entre outros. Após esta seleção prévia, foi realizada a leitura do resumo dos trabalhos restantes, sendo priorizados estudos realizados em Latossolos, com maior foco na análise dos atributos químicos do solo, ciclagem de nutrientes e potencial de estoque de carbono. Também foram priorizados trabalhos que apresentavam enfoque na recuperação de áreas degradadas pela atividade agropecuária, práticas de manejo de solos e modelos alternativos à agricultura de corte-e-queima. Em relação aos estudos na Amazônia, deu-se prioridade àqueles realizados na Amazônia brasileira. Deste total, finalmente, foram selecionadas aproximadamente 80 publicações, que serviram de base para esta revisão. A este quantitativo foram acrescentados livros, teses e dissertações, eventualmente consultados para ajudar a definir conceitos e adicionar comentários que os autores julgaram pertinentes.

### **3. Resultados e Discussão**

#### **3.1 Características dos solos da Amazônia**

Qualidade do solo pode ser definida como a capacidade do solo em sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde de plantas e animais (Doran & Parkin, 1996). A preservação da qualidade do solo é um fator determinante para assegurar os serviços e benefícios oferecidos por um determinado ecossistema (Bringezu et al., 2014). Dentre os serviços prestados pelo solo, estão a disponibilização e reserva de nutrientes para as plantas, o sequestro de carbono e o controle biológico de pragas e doenças (Muchane et al., 2020). A perda de qualidade de um determinado solo pode ser seguida da interrupção de alguns dos seus processos biológicos, os quais são importantes para a ciclagem de nutrientes, acarretando diminuição da produção vegetal nestes solos (Lima et al., 2011).

As técnicas de conservação empregadas para a recuperação de solos dependem do estudo dos atributos do solo da região em questão (Souza et al., 2018). A restauração florestal é uma ferramenta que permite a recuperação de áreas

perturbadas, ou que sofreram alteração da sua capacidade funcional de oferecerem serviços ecológicos (Chazdon, 2008). A recuperação de áreas degradadas faz-se especialmente necessária em situações em que a regeneração natural, por si só, não é capaz de garantir o retorno da cobertura vegetal original (Celentano et al., 2020).

Em termos qualitativos, existe grande diversidade de solos na Amazônia. Diferentes materiais de origem, somados à ação do intemperismo, favoreceram a diferenciação dos atributos físicos e químicos dos solos da região (Quesada et al., 2011). Em geral, a maioria dos solos compartilham características que impõem limitações à produção agrícola, principalmente devido à sua baixa fertilidade natural (Chaves et al., 2020; Moreira et al., 2009). A acidez e a toxidez por alumínio também figuram entre as mais frequentes limitações à produtividade em solos da Amazônia (Longo & Espíndola, 2000). Em termos quantitativos, entretanto, os Argissolos e Latossolos são as classes de solos mais frequentes na região, sendo caracterizados por solos de terra firme, bem drenados, ácidos e com baixa capacidade de troca catiônica (CTC) (Quesada et al., 2011). De acordo com Souza et al. (2018), aproximadamente 75% dos solos no Estado do Pará pertencem a essas duas classes.

Caracterizações dos atributos químicos de Latossolos realizadas por diversos autores em diferentes regiões da Amazônia evidenciam baixos valores de pH, alto teor de alumínio, alta saturação por alumínio e baixa CTC efetiva (Chaves et al., 2020; Malhi et al., 2009; Moreira & Malavolta, 2004; Souza et al., 2018). Além da baixa disponibilidade de bases trocáveis e alta concentração de alumínio, que está associada a um pH ácido, os solos da Amazônia, em geral, apresentam baixa concentração de nutrientes, como fósforo e nitrogênio (Luizão et al., 2009; Silva-Júnior et al., 2009), principalmente em decorrência do processo de intensa intemperização a que estão sujeitos (Chaves et al., 2020; Mantovanelli et al., 2016; Quesada et al., 2010). Diante de valores de CTC efetiva muito baixos, é especialmente importante utilizar práticas de manejo que visem aumentar ou manter a matéria orgânica do solo, diminuindo assim o potencial de lixiviação de nutrientes (Lopes & Guimarães Guilherme, 2016).

O processo de intemperismo pode levar à acidificação dos solos, promovendo a remoção de bases, especialmente cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ), que são então substituídas nos colóides do solo pelos íons  $\text{H}^+$ , ferro (Fe) e alumínio (Al) (Ronquim, 2020). Nesta situação, um aumento da matéria orgânica (MO) pode significar menores teores de alumínio, uma vez que os compostos orgânicos aniônicos presentes na MO podem complexar os cátions  $\text{Al}^{+3}$  livres na solução do solo (Machado et al., 2017).

A acidez do solo impacta direta e indiretamente seus atributos físicos, químicos e biológicos, influenciando desta forma o crescimento das plantas. Além de interferir na disponibilidade de nutrientes, podendo causar deficiência ou toxidez de elementos nas plantas, a acidez do solo afeta negativamente a atividade microbológica do solo, influenciando a taxa de decomposição da MO e a mineralização de nutrientes (FAO, 2015a). Mudanças do pH com o tempo dependem das propriedades do solo, cobertura vegetal, qualidade da MO (serapilheira) e condições ambientais (Arévalo-Gardini et al., 2015). As árvores, por exemplo, podem exercer um papel importante na redução da acidez do solo uma vez que, devido à maior área de exploração de suas raízes, podem capturar nutrientes que de outra forma seriam perdidos por lixiviação, reciclando e mantendo cátions na solução do solo (Weil & Brady, 2017).

O uso de corretivos agrícolas neutraliza o alumínio trocável, aumentando a saturação por bases (V%) e os valores de pH do solo a partir da neutralização de parte do hidrogênio adsorvido (Ronquim, 2020). Práticas de manejo que visem aumentar ou manter a matéria orgânica do solo são fundamentais para aumentar a fertilidade dos solos, assim como a prática da calagem, que também ajuda a diminuir o potencial de lixiviação de nutrientes em solos com pH ácido (Lopes & Guimarães Guilherme, 2016). Todavia, o uso de calcário e fertilizantes na região norte do Brasil ainda é incipiente devido a diversos fatores, como o preço elevado dos insumos, a dificuldade logística de transporte e armazenamento, a tradição de uma



agricultura de subsistência não tecnificada na região, a falta de suprimento e abastecimento destes insumos, entre outros (Cravo et al., 2020).

No Pará, o uso de insumos agropecuários está principalmente associado a culturas comerciais (ex.: pimenta-do-reino, cacau, dendê, guaraná, coco, laranja, hortaliças, milho, arroz, cana-de-açúcar, feijão-caupi e soja) (Cravo et al., 2020). Entre os pequenos produtores, o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo e a correção da acidez são frequentemente obtidos a partir da queima da vegetação, uma prática conhecida como corte-e-queima (Frare et al., 2017; Tremblay et al., 2015).

A agricultura de corte-e-queima leva à emissão de carbono (Celentano et al., 2020), e tem como principal efeito negativo a perda da MO do solo (Silva-Júnior, 2007). Após o desmatamento e queima do material vegetal, há uma considerável tendência de inibição da biomassa microbiana do solo (Moreira & Malavolta, 2004). Com a queima, há uma tendência de aumento do pH devido à formação de óxidos e a liberação de cátions alcalinos trocáveis no solo (Mcgrath et al., 2001). Inicialmente, a queima do material orgânico do solo promove a fertilização pelas cinzas, aumentando os teores de nutrientes como cálcio, magnésio, fósforo e potássio (Machado et al., 2017). Os benefícios da queimada, contudo, desaparecem rapidamente (Numata et al., 2007), e mesmo com a melhora após a queima, os solos continuam com baixos teores de nutrientes (Moreira & Malavolta, 2004). Após curto período de tempo, estes solos ficam sujeitos à compactação, decrescem sua fertilidade e o acúmulo de carbono, e aumenta a sua susceptibilidade à erosão (Souza et al., 2018).

Nos solos tropicais, ácidos e sujeitos à lixiviação, os nutrientes liberados pela queima da matéria orgânica estão especialmente vulneráveis à perda se não forem tomadas medidas de manutenção e manejo da matéria orgânica para trabalhar a fertilidade do solo (Melo et al., 2006; Moreira et al., 2009). O cultivo contínuo em condições de corte e queima pode levar a uma diminuição dos teores de nutrientes como fósforo, potássio, nitrogênio e manganês (Longo & Espíndola, 2000). De acordo com Brienza-Júnior et al. (2009) e Luizão et al. (2009), diversas alternativas de sistemas de produção agrícola sem o uso de fogo têm sido testadas na Amazônia, como os sistemas agroflorestais sem queima e o sistema Bragantino (Cravo et al., 2005). Experimentos com corte-e-trituração (ou “slash-and-mulch”) foram realizados em diversas regiões da Amazônia (Sá et al., 2007) utilizando-se tratores e máquinas, o que os torna praticamente inviáveis em lugares remotos da região. Estas iniciativas de produção sustentável, entre muitas outras, podem ser consideradas bem sucedidas. Todavia, são dependentes de insumos externos (aplicação de fertilizantes e calcário), geralmente, a um custo bastante elevado.

### **3.2 Matéria orgânica e carbono orgânico do solo**

A matéria orgânica do solo (MOS) é importante fonte e reserva de nutrientes para os microrganismos do solo e plantas, principalmente nitrogênio, enxofre, potássio e micronutrientes (Arévalo-Gardini et al., 2015), sendo também uma das principais fontes de fósforo na forma disponível para as plantas, em liberação contínua por meio da mineralização do fósforo orgânico (Silva-Júnior, 2007). A MOS pode influenciar os atributos químicos, físicos e biológicos dos solos (Signor et al., 2018), estando relacionada a diversas características, como estabilidade dos agregados e estrutura, taxa de infiltração e retenção de água, resistência à erosão, CTC, lixiviação de nutrientes, entre outros (Silva-Júnior, 2007). Ao aumentar a disponibilidade de nutrientes, a MOS favorece o crescimento das plantas e interfere na biodiversidade do solo (Veen et al., 2019; Wu et al., 2017).

A matéria orgânica fornecida pela serapilheira é a principal fonte de nutrientes para as plantas nas regiões tropicais (Caldeira et al., 2019; Moreira & Malavolta, 2004), havendo relação direta entre a diversidade de espécies de uma área, a qualidade da liteira e a disponibilidade de nutrientes (Machado et al., 2017). A decomposição da serapilheira pelos microrganismos do solo promove a ciclagem de nutrientes, melhorando a fertilidade do solo (Chaves et al., 2020), principalmente nas camadas superficiais, de 0 a 20 cm (Butzke et al., 2020). A remoção da serapilheira, por outro lado, pode

prejudicar a atividade dos microorganismos do solo, com consequências negativas para a ciclagem de nutrientes (Maia et al., 2015; Reed et al., 2011).

A produção total de serapilheira de uma floresta é influenciada por fatores climáticos como temperatura, umidade e precipitação, e pela cobertura do dossel, densidade e tamanho das árvores (Silva et al., 2018). Geralmente, quanto maior o volume de serapilheira, mais matéria orgânica haverá no solo (Pereira et al., 2013). Grande parte das raízes está concentrada na porção superior do solo, onde a concentração dos elementos mineralizados pela biota do solo é maior, o que aumenta as chances de absorção de nutrientes pelas plantas diante do risco de lixiviação (Machado et al., 2017). A liberação de diversas substâncias a partir da decomposição da matéria orgânica possibilita a agregação do solo, protegendo-o da ação de chuvas (Primavesi, 2006).

É através do processo contínuo de decomposição da MOS que os diversos organismos do solo se nutrem da energia nela contida e proporcionam uma série de benefícios para a fertilidade do solo, ajudando a manter a sua produtividade (Primavesi, 2006). Segundo a autora, em condições tropicais os solos agrícolas, ao contrário dos solos das florestas, apresentam predomínio de bactérias aeróbias de intensa atividade, e a acumulação de húmus é mais difícil devido ao processo de decomposição rápida da matéria orgânica. O revolvimento excessivo do solo e consequente exposição à chuva e luz solar ajudam a acelerar a decomposição da MOS, reduzindo drasticamente o seu potencial produtivo (Bernardes et al., 2009; Ronquim, 2020). Caso não seja realizado o manejo adequado da MOS após a conversão de floresta em áreas de cultivo, o solo pode perder até 50% do teor de matéria orgânica em função da maior decomposição microbiana e susceptibilidade à erosão (Silva-Júnior, 2007). Portanto, o manejo da matéria orgânica torna-se fundamental para a manutenção da fertilidade dos solos tropicais.

Os teores de MOS dos solos tropicais geralmente situam-se entre 3 e 17%, dependendo do tipo de solo (Bonilla-Bedoya et al., 2017). No Estado do Pará, diversos autores avaliaram o teor de MOS em Latossolos sob cobertura florestal, como por exemplo, Malhi et al. (2009), na Floresta Nacional de Caxiuanã; Chaves et al. (2020), no município de Tomé-Açu, e Souza et al. (2018), abrangendo diversas regiões do estado. Valores de MOS menores que 1,5% são considerados baixos; entre 1,5% e 3%, médios, e acima de 3%, altos (Lopes & Guimarães Guilherme, 2016). Os teores de MOS encontrados nesses estudos foram de 2,9%, 1,5% e 2,0%, respectivamente, evidenciando os valores médios de MOS naturalmente encontrados nos Latossolos da região.

O maior constituinte da MOS é o carbono orgânico (CO), que desempenha um papel fundamental em quase todas as funções do solo (Signor et al., 2018). O aumento da biomassa de resíduos vegetais que formam a serapilheira é um dos principais responsáveis pelo acúmulo de carbono no solo, que se dá a partir da estabilização da MOS (Butzke et al., 2020). O estoque de C está relacionado, portanto, ao fornecimento contínuo e diversificado de matéria orgânica, responsável pela estrutura e desenvolvimento da comunidade microbiana no solo (Lammel et al., 2015). Em geral, quanto mais matéria orgânica, maior o estoque de carbono de um determinado solo.

A MOS pode ser protegida quimicamente em associações com a argila e, fisicamente, em agregados do solo (Perrin et al., 2014). A intensificação da atividade biológica e a ciclagem de nutrientes promovida pelas árvores e raízes formam os agregados do solo, conferindo estabilidade estrutural, resistência à erosão e maior capacidade de retenção de água (Kamau et al., 2017; Muchane et al., 2020). A formação de agregados do solo, por sua vez, está relacionada à sua capacidade de armazenar carbono. O conteúdo de CO do solo tende a aumentar proporcionalmente com o aumento dos agregados, uma vez que os mesmos contêm C em sua formação (Fonte et al., 2010). Por outro lado, a diminuição do tamanho e perda de estabilidade dos macroagregados do solo pode indicar uma diminuição do conteúdo de carbono (Butzke et al., 2020). Souza et al. (2018) avaliaram os atributos físicos, químicos e mineralógicos de diversas classes de solos no estado do Pará, evidenciando

uma forte associação entre o teor de CO e as concentrações de fósforo, cálcio, magnésio, potássio e pH, principalmente na camada superficial do solo.

Tanto a MOS como o CO podem ser utilizados como medida para avaliar se a conversão de floresta em áreas agrícolas atuará como fonte ou dreno de carbono (Carvalho et al., 2010; Nair et al., 2009), sendo o manejo dos solos um fator determinante para o acúmulo de C no solo. Quando o sistema de plantio tem condições de garantir quantidades significativas de MO para o solo e manter a umidade, os teores de C microbiano se assemelham aos da vegetação nativa (Signor et al., 2018). Práticas como a aração do solo, por outro lado, podem ocasionar perda significativa de CO (Silva-Olaya et al., 2013).

Geralmente, a diminuição de CO ou do teor de MOS em áreas de cultivo se deve, entre outros fatores, à redução da quantidade de resíduos fornecidos pelas plantas na forma de serapilheira, ao aumento da atividade microbiana causada por melhores condições de aeração, temperatura mais elevada e maior amplitude de umedecimento e secagem no solo, que facilitam o processo de degradação da matéria orgânica (Silva-Júnior, 2007). O acúmulo de CO ao longo do perfil do solo de um sistema agrícola alterado pode demorar de 15 a 30 anos, aproximadamente, para apresentar padrões semelhantes ao da vegetação nativa (Monroe et al., 2016). Além disso, grande parte deste armazenamento se dá em frações orgânicas grosseiras (50-200 e 200-2000  $\mu\text{m}$ ), caracterizadas por alta instabilidade (Cardinael et al., 2015).

As florestas tropicais desempenham um papel particularmente importante no ciclo global de carbono (Malhi et al., 2009). O sequestro de C atmosférico envolve a captação de C através da fotossíntese e o armazenamento na biomassa vegetal e nos solos (Atangana et al., 2014). Estima-se que a floresta Amazônica armazene de 50 a 60 Pg ( $10^{15}\text{g}$ ) de C na vegetação viva acima do solo (Mitchard et al., 2014). Diante destes fatos, pesquisas recentes têm buscado soluções que diminuam o impacto da atividade humana sobre o meio ambiente, principalmente no que se refere à emissão de carbono para atmosfera e consequente aumento do efeito estufa (Somarriba et al., 2013). O sequestro de carbono pelas plantas é uma maneira de contribuir com a mitigação dos efeitos decorrentes das mudanças climáticas, e pode ser alcançado através de projetos de reflorestamento e recuperação de área degradada (West et al., 2010).

O desmatamento da Amazônia no Brasil é responsável, em grande parte, pelas emissões de C do país (Berenguer et al., 2014). Porém, maior quantidade de C é armazenada no solo do que na biomassa vegetal acima do solo, fazendo com que a MOS seja um dos maiores reservatórios de C da superfície terrestre, algo em torno de 1200 a 1500 Pg de C (Lal, 1997). A adoção de práticas culturais conservacionistas, ao contrário do preparo do solo convencional (aração) e o uso do fogo (corte-e-queima), reduz a decomposição e a mineralização da MOS, preservando o C do solo.

### 3.3 Sistemas Agroflorestais (SAFs)

Sistemas agroflorestais (SAFs) são sistemas em que culturas agrícolas são consorciadas com árvores em arranjos espaciais e sequências ao longo do tempo, apresentando diversas vantagens e interações entre seus componentes (Coelho, 2017; Lagneaux et al., 2021; Sathish et al., 2022). Essas integrações podem variar e envolver apenas integração lavoura-pecuária (ILP), integração pecuária-floresta (IPF) ou integração lavoura-floresta (ILF). Estima-se que já existam quase 15 milhões de hectares de área cultivada com algum tipo de sistemas de integração no Brasil (Ronquim, 2020). Na Amazônia brasileira, os SAFs ocorrem predominantemente em áreas de agricultura de corte-e-queima, mas também em quintais agroflorestais (Silva, 2012). A maioria dos SAFs amazônicos é do tipo silviagrícola, ou seja, em que espécies frutíferas ou alimentícias são associadas a espécies florestais, com o principal objetivo de fornecer alimentação e madeira, além de promover o enriquecimento da vegetação (Brienza-Júnior et al., 2009).

Os SAFs desempenham funções ecológicas importantes como o controle da erosão do solo, redução da lixiviação de nutrientes e aumento do sequestro de carbono (Wilson & Lovell, 2016), sendo considerados uma estratégia para recuperar



serviços do ecossistema em áreas degradadas (Cardozo et al., 2022; Schwarza et al., 2021), inclusive em solos degradados após a queima (Celentano et al., 2020). Os SAFs permitem a manutenção e até mesmo o aumento da fertilidade do solo graças a sua capacidade de promover a ciclagem de nutrientes, protegendo e alimentando a camada de liteira da superfície do solo (Luizão et al., 2009). A ciclagem de nutrientes é maior nos SAFs do que nas monoculturas devido à crescente produção de serapilheira e maior atividade microbológica no solo (Coelho, 2017), razão pela qual a disponibilidade do nitrogênio (N), por exemplo, tende a ser maior nos SAFs (Weil & Brady, 2017). Esta maior disponibilidade de N nos SAFs também pode estar relacionada à fixação de N pelas espécies florestais do sistema (Tschardt et al. 2011) e sua capacidade de, com sua rede de raízes profundas, capturar o N que de outra forma seria perdido por lixiviação (Kremen & Miles, 2012).

O fornecimento de material vegetal pelas árvores do SAF contribui para a cobertura do solo, protegendo-o contra o processo de erosão causado pela perda da camada protetora do solo formada pela serapilheira (Labrière et al., 2015). De acordo com Martins et al. (2019), a quantidade e a qualidade de serapilheira, micro e mesofauna do solo são maiores e melhores no SAF do que em áreas de pastagem, por exemplo. Segundo esses autores, os SAFs favorecem o aumento de serapilheira rica em N, que por sua vez, viabiliza a colonização da fauna do solo não somente onde foi implantado, mas também em áreas próximas. Por esta razão, a implantação de SAFs ajuda a restaurar a comunidade microbiana de solos degradados após a conversão de florestas nativas em sistemas de monocultivo (Wang et al., 2017).

A eficiência de um sistema agroflorestal depende de um bom arranjo e manejo (Coe et al., 2014). Wu et al. (2017) discutiram sobre a dificuldade de se criar um design de SAF com base em princípios ecológicos para superar as limitações ambientais dos plantios de monoculturas. É preciso considerar a inclusão de tanto maior número de espécies quanto possível, pois a maior diversificação na composição de arranjos agroflorestais fortalece e mantém a biodiversidade local (Salomão et al., 2014). De acordo com estes autores, a diversidade de espécies permite que o sistema seja mais resiliente ao proporcionar e manter altos níveis de matéria orgânica, favorecendo maior diversidade de microorganismos no solo e estimulando um sistema radicular mais robusto, capaz de explorar os diversos estratos do solo. Essas condições permitem manter o solo mais produtivo e eficiente na utilização de recursos cruciais para as plantas, como água, luz e nutrientes (Butzke et al., 2020).

De acordo com Schwarza et al. (2021), para que um SAF seja considerado um ecossistema biodiverso funcional, ele precisa atender a certos requisitos, como por exemplo, apresentar ao menos seis espécies florestais diferentes, de três grupos funcionais distintos: duas pioneiras de rápido crescimento, duas pioneiras fixadoras de N, e duas espécies intermediárias que sejam tolerantes à sombra. Espécies de crescimento rápido toleram ambientes com alta incidência de luz e solos pouco férteis. Além disso, produzem grande quantidade de biomassa, sendo importantes para o sequestro de C da atmosfera (Silva et al., 2016).

O planejamento e o desenho dos arranjos de um SAF devem considerar os diferentes estratos a serem ocupados pelas plantas no decorrer do tempo, obedecendo-se os ciclos de vida de cada espécie e suas necessidades ecofisiológicas, de maneira a viabilizar a sucessão ecológica na área (Miccolis et al., 2016). A rápida recuperação da vegetação a partir do plantio de espécies pioneiras é fundamental para melhorar as condições microclimáticas locais e a fertilidade do solo, o que facilita o estabelecimento de outras espécies na sequência (Asase & Tetteh, 2016; Meli & Dirzo, 2013). Esta mistura de plantas que ocuparão diferentes estratos permite a otimização do espaço e melhor aproveitamento dos recursos (água, luz e nutrientes) ao longo do tempo.

Globalmente, a limitação de conhecimento científico a respeito dos SAFs, naturalmente complexos; a falta de apoio institucional e de recursos para o seu desenvolvimento e a escassez dos serviços de extensão rural e mão de obra são impedimentos para a sua adoção (Nair et al., 2009; Wilson & Lovell, 2016). No Brasil, ainda há escassez de estudos e

informações sobre a adoção da agrofloresta (Braga et al., 2019). Esta baixa adoção pode ser explicada por fatores históricos e culturais e falta de conhecimento e de políticas públicas direcionadas para este fim (Coelho, 2017).

A maioria dos casos de estudo com SAFs nos trópicos úmidos envolve o uso de espécies frutíferas, notadamente cacau e café, em consórcio com espécies de crescimento rápido e alto valor de mercado, como eucalipto, teca ou seringueira (Arévalo-Gardini et al., 2015; Brienza-Júnior et al., 2009; Niether et al., 2018; Tschardt et al. 2011). Na Amazônia, a maior parte das espécies utilizadas em SAFs está voltada para a produção de alimentos, sendo necessário um trabalho de conscientização sobre a importância da adoção de espécies florestais nativas, pois, apesar de seu potencial econômico, estão sendo subutilizadas (Silva et al., 2008).

Brienza-Júnior et al. (2009) revisaram diversas publicações sobre SAFs na Amazônia. Segundo os autores, dentre as 330 espécies utilizadas, as mais frequentes são o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), a pupunha (*Bactris gasipaes*), castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*), banana (*Musa sp.*), mandioca (*Manihot esculenta*), mogno (*Swietenia macrophylla*), açai (*Euterpe oleracea*), ingá (*Inga edulis*), milho (*Zea mays*), paricá (*Schyzobium amazonicum*), seringueira (*Hevea brasiliensis*) e cacau (*Theobroma cacao*). A grande maioria dos SAFs estudados, entretanto, utilizam no máximo seis espécies, evidenciando a complexidade e a dificuldade de manejo deste sistema de produção. Em outro estudo, Silva et al. (2008) avaliaram 108 SAFs na Amazônia para identificar as principais espécies florestais utilizadas na região. Os autores identificaram 48 espécies, sendo que aproximadamente um terço delas havia sido utilizado em apenas um sistema.

Estratégias de exploração de madeira em SAFs têm favorecido a recuperação da vegetação nativa na Amazônia, com efeitos benéficos para o sequestro de C, manutenção da vida selvagem e geração de renda para as famílias em longo prazo (Blinn et al., 2013), sendo por esta razão, recomendada como opção sustentável de uso do solo na região (Oliveira et al., 2017). Todavia, a escassez de informações a respeito do desempenho e capacidade específica das diversas espécies florestais em adaptarem-se aos estresses ambientais que afetam suas funções fisiológicas e o seu desenvolvimento limita o seu uso em áreas de reflorestamento (Craven et al., 2011; Park et al., 2010).

### 3.4 A importância da seleção das espécies

As espécies utilizadas para reflorestamento e recuperação de área degradada no bioma amazônico devem se comportar de maneira satisfatória diante das condições de solo prevalentes, como baixa fertilidade, alta concentração de alumínio trocável, alta taxa de lixiviação e acidez elevada (Chaves et al. 2020; Mantovanelli et al. 2016). Recomenda-se a utilização de plantas-chave que ocorrem no ecossistema de referência para facilitar o processo de recuperação dessas áreas (Campos & Sartorelli, 2015).

A seleção criteriosa das espécies a serem utilizadas em projetos de recuperação de áreas degradadas é fundamental para o sucesso da iniciativa (Salomão et al., 2013). O projeto de recuperação deve prever a inclusão de espécies de grupos e funções ecológicas distintas; espécies de baixa dispersão natural; espécies que ofereçam abrigo e fonte de alimentação para a avifauna, e espécies raras ou ameaçadas de extinção (Lamb & Gilmour, 2003). Aspectos ambientais como a capacidade de produção de biomassa, sequestro de carbono das espécies e seu potencial em prevenir erosão do solo também deverão ser considerados (Schwarza et al., 2021).

A seleção de espécies com vista à recuperação ecológica deve ser fundamentada em base científica a partir de pesquisas desenvolvidas no local a ser restaurado ou nas suas proximidades (Vieira et al., 2008). Espécies nativas apresentam grande potencial para promover a recuperação dos solos, a conservação dos recursos naturais e a manutenção da biodiversidade local (Gris et al., 2012). Historicamente, contudo, o plantio de espécies florestais na Amazônia brasileira não

tem sido necessariamente voltado para a restauração da vegetação original e de seus benefícios ecossistêmicos, tendo por objetivo principal a obtenção de energia (madeira) (Souza et al., 2008).

Craven et al. (2011), ao avaliarem a taxa de crescimento e mortalidade de oito espécies florestais nativas no Panamá, em locais de fertilidades distintas e por diferentes períodos (estação seca e chuvosa), concluíram que, por mais que a precipitação e a fertilidade do solo tenham sido fatores importantes, o fator que mais influenciou o desenvolvimento e a mortalidade das plantas foi a própria espécie utilizada. Em solos pouco férteis, recomenda-se o uso de espécies que apresentam alto desempenho para a translocação de nutrientes (Machado et al., 2017) e que contribuam para o enriquecimento nutricional do solo a partir da produção de grande quantidade de MO, a fim de reabastecer a liteira e estimular a ciclagem de nutrientes (Celentano et al., 2020).

Os SAFs, mesmo sendo considerados prioritariamente como um sistema produtivo, apresentam grande potencial para promover a restauração florestal de áreas degradadas (Seoane et al., 2014). As raízes das espécies florestais dos SAFs, por explorarem áreas mais profundas dos solos do que as culturas anuais, podem extrair nutrientes dessas camadas e disponibilizá-los via senescência de folhas e galhos (Poggiani & Schumacher, 2000). A decomposição desse material vegetal pelos microrganismos do solo disponibiliza nutrientes que de outra forma não estariam disponíveis na camada superficial do solo. A *Acacia mangium*, por exemplo, favorece a disponibilização de P e S (Machado et al., 2017); a *Cecropia sp.* é eficiente em extrair Ca e Mg do solo (Tapia-Coral et al., 2005), enquanto a *Gliricidia sepium* pode ser uma fonte extra de N, obtido por fixação biológica (Kaba et al., 2021).

A utilização de espécies com sistemas radiculares de alcances diferentes ajuda a evitar a competição pelo uso de água e nutrientes, e melhorar sua eficiência. Neste sentido, a plasticidade das plantas também é um fator importante a ser considerado, ou seja, a capacidade da espécie de tolerar as variações de disponibilidade de água e radiação solar (Contin et al., 2014). A escolha das espécies deve, portanto, ser realizada de acordo com suas características funcionais, e não de maneira aleatória. Salomão et al. (2014) avaliaram a dinâmica de crescimento de 89 espécies em áreas de restauração após mineração em Porto Trombetas, PA, classificando-as em classes de aptidão ecológica após treze anos de estudos. Três espécies foram consideradas de ótima aptidão: *Tapirira guianensis*, *Bowdichia nítida* e *Sclerolobium paniculatum*.

A espécie *Oenocarpus bacaba*, por exemplo, apresentou desempenho bastante satisfatório em projetos de restauração florestal em áreas degradadas na Amazônia, tendo sido eleita a melhor espécie-chave entre as 25 estudadas por Salomão et al. (2013) para este fim, apontada como de alta prioridade para garantir o sucesso de projetos de reflorestamento na região. Jardim et al. (2007), estudando o efeito de diferentes tamanhos de clareiras sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas em Moju, PA, recomendaram o uso de *Jacaranda copaia* e *Newtonia suaveolens*. Souza et al. (2008), avaliando o desempenho de espécies florestais amazônicas para uso múltiplo no município de Manaus, destacaram o desempenho satisfatório de *Sclerolobium paniculatum*, *Hymenaea courbaril*, *Bertholletia excelsa*, *Swietenia macrophylla*, *Copaifera multijuga* e *Cedrela odorata*. Leão et al. (2005) avaliaram o crescimento de 29 espécies durante um período de 15 anos em Tucuruí, PA, tendo reportado os maiores incrementos em altura para a espécie *Acromia aculeata*. Costa-Azevedo (2014), estudando a dinâmica de crescimento de *C. guianensis* em Manaus, ressaltou o grande potencial de uso em reflorestamento desta espécie devido ao seu bom desempenho fotossintético e crescimento, tanto sob estresse hídrico moderado como em condições de plena luz solar. Rossi et al. (2003) testaram quinze espécies florestais, entre nativas e exóticas, em áreas de reflorestamento (monocultura) em Manaus, tendo destacado o melhor desenvolvimento de *Acacia mangium*, *Eucalyptus sp.* e *Schizolobium amazonicum*.

Em que pesem os estudos citados acima, pesquisas com espécies nativas ainda são necessárias a fim de facilitar a sua adoção em SAFs, sendo atualmente restrito o número de espécies utilizadas nesses sistemas na Amazônia (Costa & Moraes, 2013; Hérault et al., 2010; Jardim et al., 2007; Luizão et al., 2009; Silva et al., 2008). Compreender a dinâmica de sucessão em

um ambiente de floresta e, portanto, o comportamento de cada espécie em condições naturais, permite utilizar a resiliência das florestas como estratégia de manejo para reduzir os impactos ambientais da atividade agrícola (Santos & Jardim, 2012; Schwarza et al., 2021). O conhecimento sistematizado e científico de espécies potenciais poderá, desta forma, servir de base para a promoção de desenvolvimento florestal sustentável e ocupação mais racional da Amazônia, revertendo o processo de degradação do bioma (Souza et al., 2008).

#### 4. Considerações Finais

Os sistemas agrofloretais (SAFs) estão sendo utilizados na Amazônia para a recuperação de áreas degradadas pelo uso do fogo, e que perderam a fertilidade após a remoção da cobertura florestal. Esses sistemas alternativos são eficientes em manter ou repor a matéria orgânica dos solos, favorecendo desta forma a produção agroflorestal e a recuperação dos solos da região. A matéria orgânica produzida pelos SAFs pode ajudar a melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos, contribuindo também para o sequestro de carbono da atmosfera. O sucesso de um projeto de recuperação, entretanto, depende da escolha das espécies a serem utilizadas, sendo recomendado o uso de plantas de diferentes grupos ecológicos, que sejam adaptadas às condições locais de clima e solo, e que, preferencialmente, produzam biomassa em abundância para manter a ciclagem de nutrientes no solo. Uma melhor compreensão do comportamento das espécies, especialmente as nativas da Amazônia, pode contribuir para uma maior eficiência no processo de restauração da qualidade de solos degradados neste bioma, aliando produção agroflorestal com sustentabilidade ambiental. Neste sentido, é importante que trabalhos futuros avaliem o desempenho das diversas espécies nativas da Amazônia, assim como exóticas, no intuito de avaliar o seu potencial de uso para a recuperação de áreas degradadas, produção de biomassa, sequestro de carbono e outros aspectos do comportamento silvicultural dessas espécies nas condições estudadas.

#### Referências

- Almeida, A. S., Vieira, I. C. G., & Rocha, D. P. N. (2013). *Cenários para a Amazônia, clima, biodiversidade e uso da terra. Caracterização e mapeamento dos padrões de uso da terra na área de endemismo*. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi.
- Almeida, C. A. (2008). *Estimativa da Área de Ocorrência e do Tempo de Permanência da Vegetação Secundária da Amazônia Legal com Imagens TM/Landsat* [Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais].
- Arévalo-Gardini, E., Canto, M., Alegre, J., Loli, O., Julca, A., & Baligar, V. (2015). Changes in Soil Physical and Chemical Properties in Long Term Improved Natural and Traditional Agroforestry Management Systems of Cacao Genotypes in Peruvian Amazon. *PLoS ONE*, 10(7), e0132147. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132147>
- Asase, A. & Tetteh, D. A. (2016). Tree diversity, carbon stocks, and soil nutrients in cocoa-dominated and mixed food crops agroforestry systems compared to natural forest in southeast Ghana. *Agroecol Sustain Food*, 40, 96–113.
- Atangana, A., Khasa, D., Chang, S., & Degrande, A. (2014). Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. In A. Atangana, D. Khasa, S. Chang, & A. Degrande, *Tropical Agroforestry* (pp. 236-244). Springer Science+Business Media Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7723-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7723-1_10)
- Berenguer, E., Ferreira, J., Gardner, T. A., Aragão, L. E. O. C., Camargo, P. B. de, Cerri, C. E.; Durigan, M., Oliveira Junior, R. C. de, Vieira, I. C. G., & Barlow, J. (2014). A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. *Global Change Biology*, 20(12), 3713–3726.
- Bernardes, M. S., Pinto, L. F. G., & Righi, C. A. (2009). Interações biofísicas em sistemas agrofloretais. In R. Porro (Ed.), *A Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação* (pp. 423-446). Embrapa.
- Blinn, C. E., Browder, J. O., Pedlowski, M. A., & Wynne, R. H. (2013). Rebuilding the Brazilian rainforest: Agroforestry strategies for secondary forest succession. *Applied Geography*, 43, 171-181. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.06.013>
- Bonilla-Bedoya, S., López-Ulloa, M., Vanwalleghem, T., & Herrera-Machuca, M. A. (2017). Effects of Land Use Change on Soil Quality Indicators in Forest Landscapes of the Western Amazon. *Soil Science*, 182(4), 128-136. <http://doi.org/10.1097/SS.0000000000000203>
- Braga, D. P. P., Domene, F., & Gandara, F. B. (2019). Shade trees composition and diversity in cacao agroforestry systems of southern Para, Brazilian Amazon. *Agroforestry Systems*, 93,1409–1421. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0250-6>

- Brienza-Júnior, S., Maneschy, R. Q., Mourão Júnior, M., Gazel Filho, A. B., Yared, J. A. G., Gonçalves, D., & Gama, M. B. (2009). Sistemas Agroflorestais na Amazônia Brasileira: Análise de 25 Anos de Pesquisas. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 60, 67-76.
- Bringezu, S., Schütz, H., Pengue, W., Brien, M. O., Garcia, F., Sims, R., & Weiss, J. (2014). *Assessing global land use: Balancing consumption with sustainable supply*. The International Resource Panel.
- Butzke, A. G., Oliveira, T. K., Paula, A. E. B., & Fiuza, S. S. (2020). Fertilidade e carbono orgânico do solo em sistemas agroflorestais de duas décadas compostos de castanheira, cupuaçuzeiro e pupunheira na Amazônia Ocidental. *Científica*, 48(2), 160–169. <http://doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n2p160-169>
- Caldeira, M. V. W., Godinho, T. D. O., Moreira, F. L., Campanharo, Í. F., Castro, K. C., Mendonça, A. R., & Trazzi, P. A. (2019). Litter as an ecological indicator of forest restoration processes in a dense ombrophylous lowland forest. *Floresta e Ambiente*, 26, 1–11. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.041118>
- Campos, F. E. M. & Sartorelli, P. A. R. (2015). *Guia De Identificação De Espécies-Chave Para Restauração Florestal na região de Alto Telles, Mato Grosso*. The Nature Conservancy.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Barthès, B. G., Saby, N. P. A., Parent, T., Dupraz, C., Bernoux, M., & Chenu, C. (2015). Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon - A case study in a Mediterranean context. *Geoderma*, 259-260, 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.015>
- Cardozo, E. G., Celentano, D., Rousseau, G. X., Silva, H. R. E., Muchavisoy, H. M., & Gehring, C. (2022). Agroforestry systems recover tree carbon stock faster than natural succession in Eastern Amazon, Brazil. *Agroforestry Systems*, 96, 941–956.
- Carvalho, J. L. N., Raucci, G. S., Cerri, C. E. P., Bernoux, M., Feigl, B. J., Wruck, F. J., & Cerri, C. C. (2010). Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil Tillage Research*, 110, 175-186.
- Celentano, D., Rousseau, G. X., Paixão, L. S., Lourenço, F., Cardozo, E. G., Rodrigues, T. O., Silva, H. R., Medina, J., Sousa, T. M., Rocha, A. E., & Reis, F. de O. (2020). Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. *Agroforestry Systems*, 94, 1781-1792. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00496-4>
- Chaves, S. F. da S., Gama, M. A. P., Alves, R. M., Oliveira, R. P., Neto, J. L. P., & Lima, V. M. N. (2020). Evaluation of physicochemical attributes of a yellow latosol under agroforestry system as compared to secondary forest in the Eastern Amazon. *Agroforestry Systems*, 94, 1903–1912. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00513-6>
- Chazdon, R. L. (2008). Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 320, 1458-1460.
- Coe, R., Sinclair, F., & Barrios, E. (2014). Scaling up agroforestry requires research ‘in’ rather than ‘for’ development. *Curr Opin Environ Sustain*, 6, 73–77. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.013>
- Coelho, G. C. (2017). Ecosystem services in brazilian’s southern agroforestry systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20, 475–492.
- Contin, D. R., Soriani, H. H., Hernández, I., Furriel, R. P., Munné-Bosch, S., & Martínez, C. A. (2014). Antioxidant and photoprotective defenses in response to gradual water stress under low and high irradiance in two Malvaceae tree species used for tropical forest restoration. *Trees*, 28(6), 1705–1722.
- Corrêa, E. J., Vasconcelos, M., & Souza, M. S. de L. (2013) *Iniciação à metodologia: textos científicos*. NESCON-UFMG.
- Costa, A. C. L., Galbraith, D., Almeida, S., Portela, B. T. T., Costa, M. C., Silva Junior, J. A., Braga, A. P., Gonçalves, P. H. L., Oliveira, A. A. R., Fisher, R., Phillips, O. L., Metcalfe, D. B., Levy, P., & Meir, P. (2010). Effect of 7 yr of experimental drought on vegetation dynamics and biomass storage of an eastern Amazonian rainforest. *New Phytologist*, 187, 579–591.
- Costa, J. R., & Morais, R. R. (2013). *Carapa guianensis Aubl. (andirobeira) em Sistemas Agroflorestais*. Embrapa Documentos.
- Costa-Azevedo, G. F. (2014). Photosynthetic parameters and growth in seedlings of *Bertholletia excelsa* and *Carapa guianensis* in response to pre-acclimation to full sunlight and mild water stress. *Acta Amazonica*, 44(1), 67–78.
- Craven, D., Dent, D., Braden, D., Ashton, M. S., Berlyn, G. P., & Hall, J. S. (2011). Seasonal variability of photosynthetic characteristics influences growth of eight tropical tree species at two sites with contrasting precipitation in Panama. *Forest Ecology and Management*, 261, 1643–1653. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.017>
- Cravo, M. S., Corteletti, J., Nogueira, O. L., Smyth, T. J., & Souza, B. D. L. (2005). *Sistema Bragantino: Agricultura Sustentável para a Amazônia*. Embrapa Amazônia Oriental.
- Cravo, M. S., Viégas, I. J. M., & Brasil, E. C. (Eds.) (2020). *Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará* (2nd ed.) Embrapa.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: J. W. Doran & A. J. Jones (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015a). *Status of the World’s Soil Resources (SWSR) – Main Report*. FAO and Intergovernmental Technical Panel on Soils.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015b). *Recursos Forestales Mundiales - Main Report*. FAO.
- Fonte, S. J., Barrios, E., & Six, J. (2010). Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. *Geoderma*, 155, 320–328.



- Fox, J. M., Castella, J. C., Ziegler, A. D., & Westley, S. B. (2014). Rubber plantations expand in mountainous Southeast Asia: what are the consequences for the environment? *Asia Pacific Issues*, 114, 1–8.
- Frare, J. C. V., Oliveira, I. A., & Freitas, L. (2017). Potencial agroecológico da agricultura familiar de comunidades ribeirinhas agroextrativistas do Marajó, Amazônia oriental. *Unimar Ciências*, 26(1-2), 41-53.
- Gibbs, H., Ruesch, A. S., Achard, F., Clayton, M. K., Holmgren, P., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2010). Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proc. Natl. Acad. Science*, 107(38), 16732–16737.
- Gris, D., Temponi, L. G., & Marcon, T. R. (2012). Native species indicated for degraded area recovery in Western Paraná, Brazil. *Revista Árvore*, 365(1), 113-125.
- Herault, B., Ouallet, J., Blanc, L., Wagner, F., & Baraloto, C. (2010). Growth responses of neotropical trees to logging gaps. *Journal of Applied Ecology*, 47, 821–831.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019). *Sistema IBGE de Recuperação Automática*. IBGE. <https://sidra.ibge.gov.br/acervo>
- Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade do Estado do Pará (2021). *Cartilha de sistemas agroflorestais comerciais: estratégia produtiva sustentável para a agricultura familiar*. IDEFLOR-Bio.
- Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (2022). *PRODES – Programa de Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite*. INPE. <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php>
- Jardim, F. C. S., Serrão, D. R., & Nemer, T. C. (2007). Efeito de diferentes tamanhos de clareiras sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas em Moju - PA. *Acta Amazônica*, 37, 37–38.
- Kaba, J. S., Yamoah, F. A., & Acquaye, A. (2021). Towards sustainable agroforestry management: Harnessing the nutritional soil value through cocoa mix waste. *Waste Management*, 124, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.021>
- Kamau, S., Barrios, E., Karanja, N., Ayuke, F., & Lehmann, J. (2017). Soil macrofauna under dominant tree species increases along a soil degradation gradient. *Soil Biol. Biochem*, 112, 35–46.
- Kremen, C. & Miles, A. (2012). Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecology and Society*, 17(4), 40-65.
- Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V., & Bernoux, M. (2015). Soil erosion in the humid tropics: a systematic quantitative review. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 203, 127–139.
- Lagneaux, E., Andreotti, F., & Neher, C. M. (2021). Cacao, copoazu and macambo: Exploring Theobroma diversity in smallholder agroforestry systems of the Peruvian Amazon. *Agroforestry Systems*, 95, 1359–1368. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00610-0>
- Lal, R. (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub>-enrichment. *Soil & Tillage Research*, 43, 81-107.
- Lamb, D. & Gilmour, D. (2003). *Issues in forest conservation. Rehabilitation and restoration of degraded forests*. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, The World Wide Fund for Nature.
- Lammel, D. R., Nüsslein, K., Tsai, S. M., & Cerri, C. C. (2015). Land use, soil and litter chemistry drive bacterial community structures in samples of the rainforest and Cerrado (Brazilian Savannah) biomes in southern Amazonia. *European Journal of Soil Biology*, 66, 32-39.
- Leão, N. V. M., Ohashi, S. T., Vieira, I. C. G., & Ghilardi Júnior, R. (2005). *Ilha de germoplama de Tucuruí: uma reserva da biodiversidade para o futuro*. Eletronorte.
- Lima, S. S., Leite, L. F. C., Oliveira, F. C., & Costa, D. B. (2011). Atributos químicos e estoque de carbono e nitrogênio em Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. *Revista Árvore*, 35(1), 51-60.
- Longo, R. M. & Espíndola, C. R. (2000). Alterações em características químicas de solo da região amazônica pela introdução de pastagens. *Acta Amazônica*, 30(1), 71-80.
- Lopes, A. S. & Guimarães Guilherme, L. R. (2016). A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. *Advances in Agronomy*, 137, 1-73.
- Luizão, F. J., Fearnside, P. M., Cerri, C. E. P., & Lehmann, J. (2009). The maintenance of soil fertility in Amazonian managed systems. In M. Keller, M. Bustamante, J. Gash, & P. Silva Dias (Eds.), *Amazonia and Global Change - Geophysical Monograph Series*. *American Geophysical Union (AGU)*, 186, 311-336.
- Machado, M. R., Camara, R., Sampaio, P. T. B., Pereira, M. G., & Ferraz, J. B. S. (2017). Land cover changes affect soil chemical attributes in the Brazilian Amazon. *Acta Scientiarum Agronomy*, 39(3), 385-391.
- Maia, R. S., Vasconcelos, S. S., & Carvalho, J. R. de (2015). Frações de fósforo e simbiose micorrízica em floresta secundária em resposta a disponibilidade de água e nutrientes na Amazônia oriental. *Acta Amazonica*, 45(3), 255-264. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201402894>
- Malhi, Y., Aragao, L. E. O. C., Metcalfe, D. B., Paiva, R., Quesada, C. A., Almeida, S., Anderson, L., Brando, P., Chambers, J. Q., Costa, A. C. L., Hutyra, L. R., Oliveira, P., Patino, S., Pyle, E. H., Robertson, A. L., & Teixeira, L. M. (2009). Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, 15, 1255–1274. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01780.x>

- Mantovanelli, B. C., Campos, M. C. C., Alho, L. C., Francisco, N. U., Nascimento, M. F., & Santos, L. A. C. (2016). Distribuição espacial dos componentes da acidez do solo em área de campo natural na região de Humaitá, Amazonas. *Ciência Agroambiental*, 14, 01–09.
- Martins, E. M., Da Silva, E. R., Campello, E. F. C., De Lima, S. S., Nobre, C. P., Correia, M. E. F., & De Resende, A. S. (2019). O uso de sistemas agroflorestais diversificados na restauração florestal na Mata Atlântica. *Ciência Florestal*, 29(2), 632–648. <https://doi.org/10.5902/1980509829050>
- Mcgrath, D. A., Smith, C. K., Gholz, H. L. de A., & Oliveira, F. (2001). Effects of Land-Use Change on Soil Nutrient Dynamics in Amazônia. *Ecosystems*, 4, 625–45.
- Meli, P. & Dirzo, R. (2013). Effects of grasses on sapling establishment and the role of transplanted saplings on the light environment of pastures: implications for tropical forest restoration. *Applied Vegetation Science*, 16(2), 296–304.
- Melo, V. F., Schaefer, C. E. G. R., Fontes, L. E. F., Chagas, A. C., Lemos Júnior, J. B., & Andrade, R. (2006). Physical chemical and mineralogical characteristics of soils from the agricultural colony of Apiatá (Roraima, Amazonia), under different land uses and after burning. *R. Bras. Ci. Solo*, 30, 1039–1050. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600013>
- Miccolis, A., Peneireiro, F. M., Marques, H. R., Vieira, D. L. M., Arco-Verde, M. F., Hoffmann, M. R., Rehder, T., & Pereira, A. V. B. (2016). *Restauração Ecológica com Sistemas Agroflorestais: como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga*. ISPN/ICRAF.
- Mitchard, E. T. A., Feldpausch, T. R., Brienens, R. J. W., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo, A., Baker, T. R., Lewis, S. L., Lloyd, J., Quesada, C. A., Gloor, M., Steege, H. ter, Meir, P., Alvarez, E., Araujo-Murakami, A., Aragão, L. E. O. C., Arroyo, L., Aymard, G., Banki, O., Bonal, D., ... Phillips, O. L. (2014). Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 23, 935–946. <https://doi.org/10.1111/geb.12168>
- Monroe, P. H. M., Gama-Rodrigues, E. F., Gama-Rodrigues, A. C., & Marques, J. R. B. (2016). Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture, Eco-systems and Environment*, 221, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.022>
- Moreira, A & Malavolta, E. (2004). Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. *Pesq. agropec. Bras.*, 39(11), 1103–1110.
- Moreira, F. M. S., Nóbrega, R. S. A., Jesus, E. C., Ferreira, D. F., & Pérez, D. V. (2009). Differentiation in the fertility of Inceptisols as related to land use in the upper Solimões river region, western Amazon. *Science of the Total Environment*, 408, 349–355.
- Muchane, M. N., W. Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., & Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A metaanalysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 295, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899>
- Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J. Plant. Nutr. Soil. Sci.*, 172(1), 10–23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>
- Niether, W., Armengot, L., Andres, C., Schneider, M., & Gerold, G. (2018). Shade trees and tree pruning alter throughfall and microclimate in cocoa (*Theobroma cacao* L.) production systems. *Annals of Forest Science*, 75, 38. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0723-9>
- Numata, I., Chadwick, O. A., Roberts, D. A., Schimel, J. P., Sampaio, F. F., Leonidas, F. C., & Soares, J. V. (2007). Temporal nutrient variation in soil and vegetation of post-forest pastures as a function of soil order, pasture age, and management, Rondônia, Brazil. *Agric Ecosyst Environ*, 118, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.019>
- Oliveira, N. A., Silva, K. R., Silva, L. J. A., & Melo, A. H. (2017). Atributos químicos de solo sob diferentes sistemas de uso e manejo no projeto de assentamento Veneza - São Domingos do Araguaia, PA. *Revista Agroecossistemas*, 9(1), 170–179.
- Packham, C. (2015). *Wildlife of the world*. Dorling Kindersley Limited.
- Park, A., Van Breugel, M., Ashton, M. S., Wishnie, M., Mariscal, E., Deago, J., Ibarra, D., Cedeno, N., & Hall, J. S. (2010). Local and regional environmental variation influences the growth of tropical trees in selection trials in the Republic of Panama. *Forest Ecology and Management*, 260, 12–21.
- Pereira, G. H. A., Pereira, M. G., Anjos, L. H. C. dos, Amorim, T. de A., & Menezes, C. E. G. (2013). Decomposição da serapilheira, diversidade e funcionalidade de invertebrados do solo em um fragmento de Floresta Atlântica. *Biosci. Journal*, 29(5), 1317–1327.
- Perrin, A. S., Fujisaki, K., Petitjean, C., Sarrazin, M., Godeta, M., Garrica, B., Hortha, J. C., Balbino, L. C., Silveira Filho, A., Machado, P. L. O. A., & Brossard, M. (2014). Conversion of forest to agriculture in Amazonia with the chop-and-mulch method, Does it improve the soil carbon stock? *Ecosystems and Environment*, 184, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.009>
- Primavesi, A. (2006). *Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais* (18th ed.). Nobel.
- Primavesi, A. (2016). *Manual do solo vivo* (2nd ed.) Expressão Popular.
- Poggiani, F. & Schumacher, M. V. (2000). Ciclagem de nutrientes em floresta nativa. In J. L. M. Golsalves & V. Benedetti. *Nutrição e fertilização florestal*. IPEF.
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Anderson, L. O., Fyllas, N. M., Schwarz, M., & Czimeczik, C. I. (2011). Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, 8, 1415–1440. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Schwarz, M., Patiño, S., Baker, T. R., Czimeczik, C., Fyllas, N. M., Martinelli, L., Nardoto, G. B., Schmerler, J., Santos, A. J. B., Hodnett, M. G., Herrera, R., Luizão, F. J., Arneith, A., Lloyd, G., Dezzee, N., Hilke, I., Kuhlmann, I., ... Paiva, R. (2010). Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeoscience*, 7, 1515–1541. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1515-2010>

- Reed, S., Townsend, A., Taylor, P., & Cleveland, C. (2011). Phosphorus cycling in tropical forests growing on highly weathered soils. *Soil Biol.*, 26, 295–316.
- Ribeiro, P. G., Martins, G. C., Gastauer, M., Junior, E. C. da S., Santos, D. C., Júnior, C. F. C., Cavalcante, R. B. L., Santos, D. S., Carneiro, M. A. C., Valadares, R. B. da S., Junior, W. da R. N., Oliveira, G., Filho, P. W. M. S., & Ramos, S. J. (2022). Spectral and Soil Quality Index for Monitoring Environmental Rehabilitation and Soil Carbon Stock in an Amazonian Sandstone Mine. *Sustainability*, 14, 597. <https://doi.org/10.3390/su14020597>
- Ronquim, C. C. (2020). *Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais* (2nd ed.) Embrapa Territorial.
- Rossi, L. M. B., Azevedo, C. P., Souza, C. R., & Lima, R. M. B. (2003, setembro 21-28). *Potential forest species for plantations in Brazilian Amazonia* [apresentação de trabalho]. XII World Forestry Congress, Quebec, Canada. <https://www.fao.org/3/xii/0537-b1.htm>
- Sá, T. D. A., Kato, O. R., Carvalho, C. J. R., & Figueiredo, R. O. (2007). Queimar ou não queimar? De como produzir na Amazônia sem queimar, *Revista USP*, 72, 90-97.
- Salomão, R. P., Brienza-Júnior, S., & Rosa, N. A. (2014). Dinâmica de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em unidade de conservação na Amazônia. *Revista Árvore*, 38(1), 1-24.
- Salomão, R. P., Santana, A. C., & Brienza-Júnior, S. (2013). Seleção de espécies da floresta ombrófila densa e indicação da densidade de plantio na restauração florestal de áreas degradadas na Amazônia. *Ciência Florestal*, 23(1), 139-151.
- Santos, C. A. N., & Jardim, F. C. da S. (2012). Dinâmica da regeneração natural de *Vouacapoua americana* com diâmetro <5 cm, influenciada por clareiras, em Moju, Pará. *Floresta*, 42(3), 495-508.
- Sathish, B. N., Bhavya, C. K., Kushalappa, C. G., Nanaya, K. M., Dhanush, C., Devagiri, G. M., & Gajendra, C. V. (2022). Dynamics of native tree structure and diversity in coffee agroforest: a case study from Central Western Ghats. *Agroforestry Systems*, 96, 161–172. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00713-8>
- Schwarza, J., Schnabel, F., & Bauhus, J. (2021). A conceptual framework and experimental design for analyzing the relationship between biodiversity and ecosystem functioning (BEF) in agroforestry systems. *Basic and Applied Ecology*, 55, 133-151.
- Seoane, C. E., Froufe, L. C., Amaral-Silva, J., Arantes, A. C. V., Nogueira, R., & Steenbock, W. (2014, novembro 19-21). *Conservação Ambiental Forte Alcançada Através de Sistemas Agroflorestais Multiestratificados - Agroflorestas e a Restauração Ecológica de Florestas* [apresentação de trabalho]. I Seminário de Agroecologia da América do Sul, Dourados, MS, Brasil.
- Severino, A. J. (2016). *Metodologia do trabalho científico* (24th ed.). Cortez.
- Shearman, P., Bryan, J., & Laurance, W. F. (2012). Are we approaching “peak timber” in the tropics? *Biological Conservation*, 151, 17–21.
- Signor, D., Deon, M. D., Camargo, P. B., & Cerri, C. E. P. (2018). Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under different land uses in Eastern Amazon. *Sci. Agric.*, 75(3), 225-232. <http://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0089>
- Silva, K. D. A., Martins, S. V., Miranda Neto, A., Demolinari, R. D. A., & Lopes, A. T. (2016). Forest restoration after Bauxite mining: assessment of planted tree species. *Floresta e Ambiente*, 23(3), 309–319.
- Silva, P. de T. E., Brienza-Júnior, S., Yared, J. A. G., Barros, P. L. C., & Maciel, M. de N. M. (2008). Principais espécies florestais utilizadas em sistemas agroflorestais na Amazônia. *Rev. Cienc. Agrar.*, 49, 127-144.
- Silva, S. C. (2012). *Sistemas agroflorestais na Amazônia: fitossociologia, socioeconomia, análise de risco, comercialização e tendência de preços dos produtos* [Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras].
- Silva, W. B., Périco, E., Dalzochio, M. S., Santos, M., & Cajaiba, R. L. (2018). Are litterfall and litter decomposition processes indicators of forest regeneration in the neotropics? Insights from a case study in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 429, 189-197.
- Silva-Júnior, M. L. (2007). *Dinâmica do carbono e do fósforo em um Latossolo amarelo, textura argilosa, após conversão da floresta em capoeira e pastagens, na Amazônia oriental* [Tese de Doutorado em Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural da Amazônia e Embrapa Amazônia Oriental].
- Silva-Júnior, M. L., Desjardins, T., Sarrazin, M., Melo, V. S., Martins, P. F., Santos, E. R., & Carvalho, C. J. R. (2009). Carbon content in Amazonian Oxisols after Forest conversion to pasture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 9, 1603–1611. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600009>
- Silva-Olaya, A. M., Cerri, C. E. P., La Scala Jr., N., Dias, C. T. S., & Cerri, C. C. (2013). Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environmental Research Letters*, 8(1), 1-8. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015014>
- Somarriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Davila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Avila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., & Degeuvels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agric Ecosystems Environment*, 173, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013>
- Sousa, S. G. A. de, Wandelli, E. V., Lourenço, J. N. de P., & Campos, L. da S. (2009, junho 22-26). *Estabelecimento de andiroba (Carapa guianensis Aubl e Carapa procera Condolle) em sistemas agroflorestais em estágio avançado de desenvolvimento* [apresentação de trabalho]. VII Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais, Brasília, DF, Brasil.
- Souza, C. R., Lima, R. M. B., Azevedo, C. P., & Rossi, L. M. B. (2008). Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. *Scientia Forestalis*, 36(77), 7-15.
- Souza, E. S., Fernandes, A. R., Braz, A. M. S., Oliveira, F. J., Alleoni, L. R. F., & Campos, M. C. C. (2018). Physical, chemical, and mineralogical attributes of a representative group of soils from the eastern Amazon region in Brazil. *Soil*, 4, 195–212.

- Souza-Filho, P. W. M., Souza, E. B., Silva-Júnior, R. O., Nascimento Jr., W. R., Mendonça, B. R. V., Guimarães, J. T. F., Dall'agnol, R., & Siqueira, J. O. (2016). Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. *Journal of Environmental Management*, 167, 175-184.
- Tapia-Coral, S. C., Luizão, F. J., Wandelli, E. V., & Fernandes, E. C. M. (2005). Carbon and nutrient stocks in the litter layer of agroforestry systems in Central Amazonia. *Agroforestry Systems*, 65, 33-42.
- Tremblay, S., Lucotte, M., Reveret, J. P., Davidson, R., Mertens, F., Passos, C. J. S., & Romana, C. A. (2015). Agroforestry systems as a profitable alternative to slash and burn practices in small-scale agriculture of the Brazilian Amazon. *Agroforestry Systems*, 89, 193-204.
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hartel, D., Holscher, D., Juhnbandt, J., Kessler, M., Perfecto, I., Scherber, C., Schroth, G., Veldkamp, E., & Wanger, T. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - a review. *J Appl Ecol*, 48, 619-629.
- Veen, G. F., Wubs, E. R. J., Bardgett, R., Barrios, E., Bradford, M., Carvalho, S., De Deyn, G., De Vries, F., Giller, K., Kleijn, D., Landis, D., Rossing, W. A. H., Schrama, M., Six, J., Struik, P., Van Gils, S., Wiskerke, H., Van Der Putten, W. H., & Vet, L. E. M. (2019). Applying the aboveground-belowground interaction concept in agriculture: spatiotemporal scales matter. *Front. Ecol. Evol.* 7, 300. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00300>
- Vieira, I. C. G., Veiga, J. B., Yared, J. A. G., Salomão, R. P., Ohashi, S. T., Brienza-Júnior, S., Silveira, C. T. E., & Biazatti, M. (2008). *Bases técnicas e referenciais para o programa de restauração florestal do Pará: um bilhão de árvores para a Amazônia*. Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará.
- Wang, J., Chen, Y., Shao, X., Zhang, Y., & Cao, Y. (2012). Land use policy land use changes and policy dimension driving forces in China: Present, trend and future. *Land Use Policy*, 29(4), 737-749.
- Wang, J., Ren, C., Cheng, H., Zou, Y., Bughio, M. A., & Li, Q. (2017). Conversion of rainforest into agroforestry and monoculture plantation in China: Consequences for soil phosphorus forms and microbial community. *Science of the Total Environment*, 595, 769-778. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.012>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soil* (15th ed.). Pearson.
- West, P. C., Gibbs, H. K., Monfreda, C., Wagner, J., Barford, C. C., Carpenter, S. R., & Foley, J. A. (2010). Trading carbon for food: global comparison of carbon stocks vs. crop yields on agricultural land. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 107(46), 19645-19648. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011078107>
- Wilson, M. & Lovell, S. (2016). Agroforestry - the next step in sustainable and resilient agriculture. *Sustainability*, 8, 574. <https://doi.org/10.3390/su8060574>
- Wu, J., Liu, W., & Chen, C. (2017). How do plants share water sources in a rubber-tea agroforestry system during the pronounced dry season? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236, 69-77. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.017>