



Aline Furtado Rodrigues

**Avaliação dos serviços ecossistêmicos do solo
para a gestão sustentável de paisagens**

Tese de doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Geografia pelo Programa de Pós-graduação em Geografia, do departamento de Geografia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Dra. Agnieszka Ewa Latawiec
Co-orientadora: Dra. Gabriela Teixeira Duarte

Rio de Janeiro
Março de 2022



Aline Furtado Rodrigues

**Avaliação dos serviços ecossistêmicos do solo
para a gestão sustentável de paisagens**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Geografia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Profa. Dra. Agnieszka Ewa Latawiec

Orientadora

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Dra. Gabriela Teixeira Duarte

Co-orientadora

Instituto Internacional para Sustentabilidade

Prof. Alexandro Solórzano

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Profa. Dra. Aliny Patricia Flauzino Pires

Departamento de Ecologia - UERJ

Prof. Fabio Rubio Scarano

Departamento de Ecologia - UFRJ

Prof. Wenceslau Geraldes Teixeira

Embrapa Solos

Rio de Janeiro, 23 de março de 2022

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Aline Furtado Rodrigues

Graduada e Mestre em Geografia e Meio Ambiente pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Atualmente, é aluna de doutorado em Geografia pela mesma universidade com parte do doutorado na Escola de Ciências Ambientais da Universidade de East Anglia (UK). É assistente de pesquisa no Instituto Internacional para Sustentabilidade (IIS) e integra os grupos de pesquisa de Gestão Integrada da Paisagem (PUC-RIO), Centro de Ciências da Conservação e Sustentabilidade do Rio (CSRio), Grupo Interinstitucional de Pesquisa em Serviços Ecossistêmicos, Laboratório de Biogeografia e Ecologia Histórica (LaBEH) e o Núcleo de Estudo da Paisagem - NEP (PUC-Rio). Tem experiência nas áreas de história ambiental, ecologia histórica, ciência do solo e restauração florestal da Mata Atlântica. Atuou e atua em projetos de caracterização de solos e avaliação/valoração de Serviços Ecossistêmicos do solo de sistemas agrícolas, pecuários e florestais.

Ficha Catalográfica

Rodrigues, Aline Furtado

Avaliação dos serviços ecossistêmicos do solo para a gestão sustentável de paisagens / Aline Furtado Rodrigues ; orientadora: Agnieszka Ewa Latawiec ; co-orientadora: Gabriela Teixeira Duarte. – 2022.

114 f. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia e Meio Ambiente, 2022.

Inclui bibliografia

1. Geografia e Meio Ambiente – Teses. 2. Função do solo. 3. Valoração monetária. 4. Mercado de carbono. 5. Objetivos para o desenvolvimento sustentável. I. Latawiec, Agnieszka Ewa. II. Duarte, Gabriela Teixeira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Geografia e Meio Ambiente. IV. Título.

CDD: 910

Aos meus pais José e Maria, aos meus irmãos Adriana e Alexandre, ao meu companheiro Lucas e a meu filho de 4 patas Sushi (*in memoriam*), por toda dedicação e amor.

Agradecimentos

O doutorado me ensinou muitas coisas. Mas talvez a mais importante tenha sido ter resiliência. A gente pode até planejar dias, meses e anos para a execução de nossas pesquisas, mas a realidade é que o mundo não está nem aí para o nosso planejamento. Em paralelo a nossa vida acadêmica existem diversas coisas boas e, infelizmente ruins acontecendo de forma concomitante que podem nos tirar fora do eixo. E é nesse momento que precisamos puxar o fôlego, pensar novos caminhos, se recriar e não deixar se abater. Eu definitivamente sou uma outra pessoa após o fim desse ciclo.

Manter a sanidade mental durante o doutorado é tarefa difícil e eu espero que a ciência seja fraterna aos nossos futuros doutores. Eu digo que passei bem nesse período graças a muitas pessoas, que me apresentaram novos portais, discutiram comigo o meu tema, me deram uma palavra de conforto quando eu estava nervosa e que me fizeram refletir que esse trabalho não é a minha vida e sim parte dela.

Agradeço a minha orientadora, Agnieszka Latawiec, por aceitar estar comigo nessa trajetória, me guiando com muita dedicação, incentivo e confiança durante esses anos. Obrigada por todas as oportunidades e portas que abriu para mim nesse caminho. Você é uma mulher inspiradora e de um coração maravilhoso.

Agradeço também a minha co-orientadora Gabriela Duarte, por todo o conhecimento compartilhado, paciência e leveza. Espero que esse trabalho fortaleça ainda mais os nossos laços e que possamos através de nossas missões como cientistas transformar um pouco desse mundo.

Agradeço a PUC-Rio por me formar como profissional e me oferecer um ambiente lindo e inspirador. Eu fui muito feliz nessa universidade. Um agradecimento especial aos professores Rogerio Oliveira e Alexandro Solórzano, por despertarem em mim a curiosidade na ciência, seja através das disciplinas, campos e projetos. Agradeço ao Gabriel Paes, Adi Lazos, Carine Lacerda, Maria Luciene e Lucas Brasil por trocas valiosas ao longo

dessa trajetória e vida na PUC. Com certeza meus dias felizes nessa universidade estão relacionados a companhia de vocês.

Agradeço ao Bernardo Strassburg junto da Agnieszka, por me conceder o privilégio de integrar a equipe do Instituto Internacional para Sustentabilidade (IIS- Rio). O IIS contribui muito na minha formação e eu serei eternamente grata a esse time. Um agradecimento especial: a Viviane Dib, por todas as trocas científicas e carinho durante essa trajetória; a minha equipe de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação – Ingrid Pena, Bruna Medeiros, Maiara Mendes, Katarzyna Korys e Ana Paula – por tantas ideias inovadoras e criativas em nossos projetos; e a Sara Mortara pelo apoio em análises dessa tese.

Um agradecimento especial ao Brian Reid que me acolheu em seu grupo na Universidade da East Anglia durante parte da execução dessa tese. Só tenho boas lembranças do período em que estive em Norwich.

Agradeço também a minha equipe de campo, Adilson Pintor, Verônica Maioli, Adriano Tamm e Yuri de Carvalho, por toda a ajuda e bom humor em nossas viagens. E um importante agradecimento a Associação do Mico Leão-Dourado pela ajuda na implementação do experimento.

Agradeço a banca por aceitarem avaliar esse estudo e contribuírem com a melhoria desse trabalho. Espero poder retribuí-los um dia essa gentileza.

Agradeço aos meus pais e irmãos, do fundo do meu coração, todo o investimento e apoio em minha trajetória acadêmica e de vida. Vocês são meus pilares e minha inspiração diária. Ao meu companheiro Lucas, por todo amor, incentivo e conselhos. Obrigada por estar sempre ao meu lado. E ao nosso eterno filho Sushi por todo o conforto e carinho nos momentos difíceis.

Agradecimento a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela bolsa de doutorado. E a *Royal Society / Newton Advances Fellowship* nº NAF/R2/180676 pela oportunidade de realizar parte desse trabalho na Universidade da East Anglia – UK.

Resumo

Rodrigues, Aline Furtado; Latawiec, Agnieszka Ewa (Orientadora). **Avaliação dos serviços ecossistêmicos do solo para a gestão sustentável de paisagens**. Rio de Janeiro, 2022. 114p. Tese de doutorado – Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A degradação de paisagens em diferentes escalas espaciais e temporais têm ameaçado a vida humana e não humana na Terra. O conceito dos serviços ecossistêmicos (SE) surge para contribuir na transformação desse cenário, buscando promover a gestão sustentável de paisagens. Diversas estruturas conceituais sobre os SE foram desenvolvidas nos últimos anos. Contudo, a definição de serviços do solo foi pouco discutida, bem como o reconhecimento do amplo papel desse recurso na prestação de serviços essenciais à vida humana. A apropriação deste conceito é ainda menos frequente em pesquisas nos países da região tropical, devido ao baixo número de estudos, projetos e iniciativas dedicadas ao tema, quando comparados com a região temperada. Essa situação coloca importantes domínios biogeográficos, como a Mata Atlântica, em maiores dificuldades de transformar o atual cenário de degradação e recuperar sua biodiversidade. Nesse contexto, este estudo busca aprofundar a discussão sobre o papel dos solos como provedores de SE, com foco na região tropical, além de aplicar métodos de avaliação de tais serviços em uma área de restauração ecológica na região da Mata Atlântica Brasileira. Para isso, se avaliou e discutiu como os solos foram relatados e percebidos ao longo do tempo, sua relação com o conceito de paisagem e como são vistos nas estruturas de SE. Ainda, este trabalho esclarece e diferencia o conceito de SE do solo de outros conceitos associados, tais como, propriedade, processo e função do solo, e também a sua relação com os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável. Em seguida, realizou-se uma revisão sistemática para avaliar o estado da arte dos SE do solo em regiões tropicais. Por fim, avaliou-se o efeito de diferentes técnicas no plantio de mudas para a recuperação ambiental e sua consequente influência na qualidade do solo e provisão do serviço de

estoque de carbono, em uma região tropical brasileira dentro do domínio Mata Atlântica. Além disso, o SE de estoque de carbono foi valorado. Uma estrutura conceitual atualizada foi desenvolvida, sintetizando os SE do solo e sua relação com os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável, útil à academia e aos tomadores de decisão. Além disso, os resultados demonstraram baixo número de publicações e uma grande lacuna de conhecimento referente às abordagens de SE do solo na região tropical. Com relação às técnicas de plantio analisadas, observou-se que mesmo com a baixa sobrevivência das plântulas, o manejo com o plantio das mudas apresentou efeito positivo para a qualidade do solo, ao longo de quatro anos. Essas mudanças podem gerar benefícios ambientais e econômicos aos proprietários, considerando o fortalecimento de um mercado de carbono no país. Este trabalho preenche algumas lacunas de conhecimento relacionadas à temática dos SE do solo na região tropical e oferece informações úteis para a gestão sustentável de paisagens.

Palavras-chave

Função do solo, Valoração monetária, Mercado de carbono, Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

Abstract

Rodrigues, Aline Furtado; Latawiec, Agnieszka Ewa (Advisor). **Assessment of soil ecosystem services for sustainable management of landscapes.** Rio de Janeiro, 2022. 114p. Tese de doutorado – Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Landscapes degradation at different spatial and temporal scales have threatened human and non-human life on Earth. The Ecosystem Services (ES) concept and framework appears to contribute to the transformation of this scenario, seeking to promote the sustainable management of landscapes. Several conceptual frameworks on ES have been developed in recent years. However, the definition of soil services was little discussed and the recognition of the broad role of this resource in the provision of essential services to human life. The appropriation of this concept is even less frequent in research in the countries of the tropical region due to the low number of studies, projects and initiatives dedicated to the theme compared to the temperate region. This situation places important biogeographic domains, such as the Atlantic Forest, in greater difficulties in transforming the current degradation scenario and recovering its biodiversity. In this context, this study seeks to deepen the discussion on the role of soils as providers of ES, focusing on the tropical region and applying methods of evaluation of such services in an ecological restoration area in the Brazilian Atlantic Forest region. We evaluated and discussed how soils were reported and perceived over time, their relationship with the concept of landscape and how they are seen in ES structures. Furthermore, this work clarifies and differentiates the concept of soil ES from other associated concepts, such as soil property, process and function, and its relationship with the Sustainable Development Goals. Then, a systematic review was carried out to assess the state of the art of soil ES in tropical regions. Finally, the effect of different techniques in planting seedlings for environmental recovery and their consequent influence on soil quality and provision of carbon stock service in a Brazilian tropical region within the Atlantic Forest domain was evaluated. In addition, the valuation of the

carbon stock service was done. An updated conceptual framework was developed, synthesizing the soil ES and their relationship with the Sustainable Development Goals, useful to academia and decision-makers. In addition, the results showed a low number of publications and a large knowledge gap regarding soil ES approaches in the tropical region. Regarding the planting techniques analyzed, it was observed that even with the low survival of the seedlings, the management with the planting of seedlings had a positive effect on soil quality over four years. These changes can generate environmental and economic benefits for the owners, considering strengthening a carbon market in the country. This work fills in some knowledge gaps related to the soil ES theme in the tropical region and offers helpful information for the sustainable management of landscapes.

Keywords

Soil function, Monetary valuation, Carbon market, Sustainable Development Goals

Sumário

Introdução geral	17
Objetivos	21
Esboço da tese e abordagem experimental.....	22
Capítulo 1 – Estrutura conceitual para orientar estudos e gestão dos serviços ecossistêmicos do solo	24
1. Introdução	24
1.1 - Percepção dos solos ao longo do tempo e sua integração ao conceito de paisagem	26
1.2 - Os solos nas estruturas de serviços ecossistêmicos gerais e específicas	31
1.3 - Serviços do solo e seus conceitos associados – funções, propriedades e processos do solo	35
1.4. Estrutura conceitual dos serviços do solo e conexões com os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável.....	38
2 – Conclusões	42
Capítulo 2 – Revisão sistemática dos serviços ecossistêmicos do solo em regiões tropicais	43
1. Introdução	43
2 - Material e métodos	47
3 - Resultados e Discussão	49
3.1. Classificação dos serviços ecossistêmicos do solo nos estudos de caso.....	49
3.2 - Avaliando e valorando os serviços ecossistêmicos do solo.....	52
3.3. Distribuição temporal e geográfica dos estudos de caso	54
4 - Conclusões	57
Capítulo 3 – Manejando plântulas para a restauração do solo e provisão de serviços ecossistêmicos: uma avaliação para a Mata Atlântica Brasileira	59
1 - Introdução.....	59
2 - Materiais e métodos	63
2.1 - Caracterização da área de estudo.....	63
2.2 - Desenho experimental	65
2.3 - Coleta e análise de informações das mudas	67
2.4 - Amostragem e análise de solo.....	67
2.5 - Valoração do serviço de estoque de carbono no solo	68

3 - Resultados.....	69
3.1 - Sobrevivência	69
3.2 - Propriedades químicas e físicas do solo	71
3.3 - Valoração do serviço de estoque de carbono no solo	72
4 – Discussão	73
4.1 – Sobrevivência	74
5 – Conclusões	79
Conclusões gerais	80
Referências:.....	82
Anexos	101
Apêndices	102
A Artigo da Tese Publicado em Periódico	113

Lista de figuras:

Figura 1 – Linha do tempo sobre alguns marcos na ciência do solo e sua relação com os serviços ecossistêmicos do solo de regulação, provisão e cultural

Figura 2 – Estrutura conceitual ilustrativa dos serviços ecossistêmicos do solo e seus conceitos associados – propriedades do solo, processos e funções do solo, e os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável relacionados aos serviços do solo. Esta estrutura é baseada em ideias contidas em Dominati et al., 2010; Robinson et al., 2013; Baveye et al., 2016; Baveye et al., 2020

Figura 3 – Estrutura conceitual ilustrativa dos serviços ecossistêmicos do solo e seus conceitos associados – propriedades, processos e funções do solo. Esta estrutura é baseada em ideias contidas em Dominati et al., 2010; Robinson et al., 2013; Baveye et al., 2016; Baveye et al., 2020

Figura 4 – Diagrama de fluxo da revisão sistemática

Figura 5 – Classificação dos serviços ecossistêmicos do solo de acordo com os artigos da base de dados

Figura 6 – Os serviços ecossistêmicos do solo mais abordados na revisão sistemática

Figura 7 – Número de estudos relacionados aos serviços ecossistêmicos do solo ao longo do tempo

Figura 8 – Mapa resumindo os estudos de caso vinculados a países da região tropical. As cores nos gráficos de pizza descrevem como os serviços ecossistêmicos do solo foram definidos

Figura 9 – plantio de mudas na sobrevivência de plantas e recuperação do solo. I) Os tratamentos com biocarvão contribuem para a maior sobrevivência de algumas espécies da Mata Atlântica; II) o plantio ativo favorece o acúmulo de carbono e melhoria na qualidade do solo ao longo do tempo. A sobrevivência das mudas contribui para a recuperação do solo que por sua vez contribui para a sobrevivência maior das mudas. Esse processo contribui para o acúmulo maior de carbono e melhoria na qualidade do solo. Ênfase ao carbono no solo, que está relacionado aos serviços ecossistêmicos de estoque de carbono que será valorado no estudo

Figura 10 – Mapa de localização da área em que o experimento foi desenvolvido

Figura 11 – Função de sobrevivência de mudas de *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze, *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Senna multijuga* (Rich.) H.S. Irwin & Barneby, e *Trema micranta* (L.) predita pelos modelos de sobrevivência selecionados. Modelo de sobrevivência com distribuição Weibull. Os fatores incluídos nos modelos estão relacionados à presença ou ausência

de biocarvão, hidrogel ou calcário como também as suas quantidades (20% ou 40%)

Figura 12 – Mudança temporal no conteúdo de pH, K, P, Ca, Mg, N, MO, COS, Argila, Areia & Silte, sendo T0 o início do experimento de plantio direto em área degradada, T1 o 45º mês e T2 o 51º mês. Floresta refere-se aos dados coletados em solo adjacente a área do experimento que se encontra sob uma vegetação florestal preservada

Lista de tabelas:

Tabela 1 – Resumo dos estudos emblemáticos sobre SE e como os serviços do solo foram mencionados

Tabela 2 – ODS's e suas relações com os solos

Tabela 3 – Estudos, serviços ecossistêmicos do solo avaliados de acordo com os autores e descrição dos métodos

Tabela 4 – Informações sobre os compostos formados pelos viveiros para a produção de mudas

Tabela 5 – Número de mudas plantadas para cada espécie em cada tratamento

Tabela 6 – Modelos selecionados para os efeitos dos tratamentos na sobrevivência das espécies do experimento. Os modelos foram calculados usando a estimativa de Máxima Verossimilhança e usando o Critério de Informação de Akaike. O tempo foi modelado até a morte do indivíduo ou última visita feita usando uma distribuição Weibull e as variáveis biocarvão, calcário e hidrogel foram considerados como efeitos fixos. AIC = Critério de Informação de Akaike; ΔAIC = AIC para cada modelo — AIC para o modelo de melhor ajuste. Df são os graus de liberdade. peso de Akaike é o peso da evidência de cada modelo

Tabela 7 – Valor monetário do serviço ecossistêmico de estoque de carbono em área de restauração na Mata Atlântica Brasileira e sua equivalência para 1 hectare, com diferentes cenários de valor do CO_{2eq}

Lista de abreviatura e siglas

BPBES – Plataforma Brasileira Intergovernamental de Políticas Científicas sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos

C – Carbono

Ca – Cálcio

CAST – *Soil carbon, aggregation, structure turnover*

CICES – *Common International Classification of Ecosystem Services*

CNP – Contribuição da Natureza para as pessoas

CO_{2eq} – CO₂ equivalente

COS – Carbono orgânico do solo

D – Densidade média

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

K – Potássio

FAO – *Food and Agriculture Organization*

GEE – Gases do efeito estufa

IPBES – *Intergovernmental science-policy platform for biodiversity and ecosystem services*

Mg – Magnésio

MEA – *Millenium Ecosystem Assessment*

MO – Matéria orgânica

MOSES – *Modelling soil ecosystem services*

N – Nitrogênio

Na – Sódio

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

P – Fósforo

REBIO – Reserva Biológica de Poço das Antas

RECSOIL – *Re-carbonisation of global soils*

S – Enxofre

SE – Serviços Ecossistêmicos

TEEB – *The Economics of Ecosystem and Biodiversity*

UNDP – *United Nations Development Programm*

WoS – *Web of Science*

Sabia que para um pé crescer forte tinha que se fazer a limpeza todos os dias, para que não surgisse praga. Precisava apurar ao redor do caule de qualquer planta. Fazendo montículos de terra. Precisava aguar da mesma forma, para que crescesse forte. Meu pai, quando encontrava um problema na roça, se deitava sobre a terra com o ouvido voltado para seu interior, para decidir o que usar, o que fazer, onde avançar, onde recuar. Como um médico à procura do coração.

Itamar Vieira Junior, *Torto Arado*

Introdução geral

Áreas naturais em todo o planeta têm sido substituídas por extensas produções agropecuárias, atividades de mineração e cidades em processo de urbanização. Essas alterações na paisagem são reflexo da mudança no estilo de vida da sociedade que tem, por exemplo, passado a consumir dietas mais intensivas em terra e água, mecanizado as atividades em áreas rurais, demandado mais energia e produzido maior quantidade de bens materiais (FAO, 2011; GRIMM et al., 2008). Desde a década de 70 do século passado, essa situação vem ganhando destaque com as Conferências Mundiais que abordam a forma inapropriada de utilização dos recursos naturais pelo homem e os riscos associados a essas ações. Mais recentemente, dados da Plataforma Intergovernamental de Políticas Científicas sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES), que reúne um conjunto de especialistas internacionais, indicam que três quartos da superfície terrestre de florestas, pântanos e campos foram degradados por ações antrópicas (IPBES, 2019), prejudicando o bem-estar humano e a vida de diversos seres vivos. Nesse sentido, tal transformação da paisagem no mundo tem levado a perda generalizada da biodiversidade e da provisão dos Serviços Ecossistêmicos (SE). Os SE é compreendido como todos os benefícios que o ser humano obtém dos ecossistemas (MEA, 2005), e também como os fluxos que apresentam valor para a sociedade como resultado do estado e da quantidade de capital natural (SUKHDEV et al., 2010)

Esse cenário pode ainda piorar se a tendência de degradação ambiental se mantiver e a população mundial continuar a crescer e atingir a estimativa de 9,7 bilhões de habitantes no ano de 2050, conforme as projeções das Nações Unidas (UN DESA, 2019). Contornar essa situação simboliza enorme desafio científico, social e político, principalmente para os países da região tropical, que apesar de sua riqueza em termos de biodiversidade e SE, também apresentam baixos índices de desenvolvimento humano (IDH) com parte de suas populações vivendo em pobreza (UNDP, 2019). Tais países precisarão lidar com o crescimento populacional,

desenvolvimento econômico, concomitantemente com a conservação e restauração dos ecossistemas (STRASSBURG et al., 2014). Além disso, disso precisarão lidar com os impactos das mudanças climáticas, cada vez mais evidentes.

A abordagem dos SE surge motivada do esforço de reconhecer o papel da natureza nas atividades econômicas, como uma via de impedir maior perda da biodiversidade e degradação da terra (BAVEYE et al., 2016). Desde o final do século passado, a comunidade científica tem ampliado os esforços nessa temática, promovendo conexões entre pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento e representantes políticos (BALVANERA et al., 2012a, 2020; BAVEYE et al., 2016). Diversos avanços já ocorreram, dentre os quais a elaboração de estruturas conceituais com a identificação dos SE de provisão, regulação, suporte e cultural (MEA, 2005), assim como, tentativas de valoração econômica e biofísica dos SE (STRASSBURG et al., 2016; SUKHDEV et al., 2010). Além disso, a listagem dos SE tem contribuído para garantir o seu reconhecimento nas políticas públicas, com potencial para ocasionar a criação de leis que garantem a proteção e manutenção dos SE (COSTANZA et al., 2017).

No âmbito de SE, o solo é um componente da natureza que promove benefícios muitas vezes negligenciados ou mal compreendidos (ADHIKARI et al., 2016). Relatórios internacionais como o *UK National Ecosystem Assessment* e o *Millenium Ecosystem Assesment* (MEA) pouco avaliaram o solo e seus SE prestados. Os processos e componentes do solo que produzem benefícios não são percebidos tão diretamente pelos seres humanos quanto os que ocorrem na superfície terrestre. Mesmo ancorando a biosfera tropical e fornecendo bens públicos (LATAWIEC et al., 2020), os solos durante muito tempo não foram priorizados para a proteção.

No ano de 2010 surge pela primeira vez a tentativa de desenvolvimento de uma estrutura conceitual para os SE do solo (DOMINATI et al., 2010). Nos anos seguintes, outros grupos de pesquisadores aprofundaram tais conceitos (ADHIKARI et al., 2016; ROBINSON et al., 2013) e também se dedicaram a atribuir valores

monetários aos serviços prestados por esse recurso natural, acreditando ser uma via de melhor diálogo com os tomadores de decisão (DOMINATI et al., 2014; LATHUILLIERE et al., 2017; ZHENG et al., 2019). A inclusão dos SE do solo, em processos de formulação de políticas públicas vêm sendo sugeridos por diversos cientistas. Por exemplo, o documento *UK-centric Environment Land Management Scheme* sugere um sistema de pagamento aos fazendeiros e proprietários de terra que sequestram carbono no solo. O esquema está em fase de planejamento e teste (2021-2024) e será implementado em todo o território do Reino Unido em 2024 (DEFRA, 2020a; KEENOR et al., 2021).

A forma como o conceito de SE do solo e outros conceitos associados vêm sendo abordados e utilizados na região tropical ainda precisam ser melhor explorados. A maior parte dos estudos sobre os SE do solo foram desenvolvidos na região temperada, mais especificamente na Europa e na América do Norte (ADHIKARI et al., 2016). Além disso, são necessários mais estudos sobre como avaliar e valorar a prestação dos SE do solo em diferentes contextos (agropecuário, restauração, parques urbanos, etc), para de fato promover uma linguagem de entendimento comum com os tomadores de decisão (ADHIKARI et al., 2016; LATAWIEC et al., 2020).

A restauração de florestas tem sido incentivada em todo o mundo para promover e garantir o fornecimento de SE. No entanto, devido à falta de consciência da importância do solo, esse recurso é frequentemente esquecido nas etapas de planejamento, implementação e monitoramento da restauração (NOLAN et al., 2021). No contexto da restauração florestal e mais específico da Mata Atlântica Brasileira, os solos com frequência são pouco investigados (MENDES et al., 2019). Impulsionar o estudo dos solos alinhados ao conceito dos SE no contexto da restauração florestal, tem potencial para aumentar a escala de recuperação de diversos ecossistemas. O plantio de mudas, em áreas que não regeneraram naturalmente, simboliza um caminho para a recuperação dos solos degradados, visto que o enraizamento pode melhorar a sua estrutura e ajudar no acúmulo de matéria orgânica (SALTON et al., 2014). Ainda, a

própria matéria orgânica pode melhorar também a estrutura e ser aporte de nutrientes para os microorganismos do solo e plantas (ALCANTARA, 2016). Promover a recuperação dos solos conectada ao conceito dos SE no contexto da restauração florestal está fundamentada no incentivo ao manejo sustentável da terra e na melhor comunicação dos benefícios advindos dessa gestão aos atores envolvidos no contexto.

Uma das dificuldades perceptíveis na literatura sobre os SE do solo é a falta de consenso sobre o significado do conceito, que muitas vezes vem sendo utilizado como sinônimo aos conceitos de processos e funções do solo (DE GROOT et al., 2002; DOMINATI et al., 2010; ROBINSON et al., 2012). Isso dificulta uma linguagem comum aos profissionais envolvidos na temática. Outro problema relacionado ao tema é que não há estudo que avalie, sintetize e estruture como a abordagem vem sendo utilizada na região tropical, área com países que dependem de ações urgentes no combate ao desmatamento e no uso insustentável da terra. Além disso, devido às incertezas sobre o conceito e o complexo diálogo entre cientistas de diferentes disciplinas, a ciência tem avançado pouco na aplicação de métodos de avaliação e valoração dos SE do solo (BAVEYE et al., 2016; DOMINATI et al., 2014).

Ampliar a base de conhecimento sobre os solos e seus SE prestados pode contribuir no reconhecimento da importância dos solos por parte do governo e sociedade civil, juntamente com as recentes iniciativas internacionais como a “4 per 1000” e a “RECSOIL (*Re-carbonisation of global soils*)”. Ambas iniciativas focam no incentivo de ações práticas sustentáveis em áreas agrícolas para aumentar o carbono orgânico do solo (COS) e trazem para a discussão e compromissos outros atores para além da comunidade científica (MINASNY et al., 2017). Assim, os solos oferecem oportunidades de estarem na vanguarda das práticas e políticas ao combate às mudanças climáticas globais (FAO, 2020; RUMPEL et al., 2020; SOUSSANA et al., 2019), mitigando efeitos adversos à qualidade de vida humana e não humana. Além disso, os solos desempenham um papel importante em vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS's) relacionados a terra, tais como a erradicação da pobreza (ODS 1), fome

zero e agricultura sustentável (ODS 2), água potável e saneamento (ODS6), ação contra a mudança global do clima (ODS13) e vida terrestre (ODS 15), entre outros (BOUMA, 2020).

A abordagem do SE abrange questões de grande desafio na atualidade, pois auxilia no diálogo entre diversas esferas da sociedade (LATAWIEC et al., 2019, 2020). A tentativa de comunicar da melhor forma os resultados acadêmicos para a tomada de decisão devem ser incentivados em toda comunidade científica. Essa discussão também é importante no contexto dos diversos biomas na região tropical, a se destacar a Mata Atlântica Brasileira que vive com o desafio de conservar e restaurar a sua cobertura vegetal ao mesmo tempo em que está sob pressão da urbanização de grandes cidades e degradação dos solos (JOLY et al., 2014; TABARELLI et al., 2005). Dessa forma, estudos com o enfoque nos solos e na abordagem dos SE simbolizam um caminho promissor para manter a qualidade de vida da natureza humana e não humana e garantir a oferta de recursos para as próximas gerações.

Objetivos

Dadas as necessidades de pesquisas citadas acima, o objetivo geral do estudo é aprofundar a discussão sobre o papel dos solos como provedores de SE, com foco especial na região tropical, e aplicar métodos de avaliação e valoração de tais serviços em uma área de restauração ecológica na região tropical – Mata Atlântica Brasileira – de forma a contribuir para a gestão sustentável de paisagens. Além disso, o estudo tem como objetivos específicos:

1 – Aprimorar a discussão dos SE do solo e elaborar uma estrutura conceitual baseada na revisão de diferentes estruturas gerais e de solos publicados nos últimos anos (Capítulo 1).

2 – Avaliar o estado da arte dos SE do solo em regiões tropicais de forma a orientar pesquisas futuras e estimular uma visão crítica mais robusta sobre a avaliação e valoração dos serviços do solo (Capítulo 2).

3 – Avaliar o efeito de diferentes técnicas no plantio de mudas para a recuperação ambiental e sua consequente influência na qualidade do solo e provisão do SE de estoque de carbono (Capítulo 3).

Esboço da tese e abordagem experimental

Esta tese está dividida em 3 capítulos e um capítulo final com as conclusões gerais.

No capítulo 1, o estudo teve como propósito avaliar e discutir a temática dos SE do solo e elaborar uma estrutura conceitual atualizada baseada na revisão de diferentes estruturas gerais e de solos publicadas nos últimos anos. Para isso, foi discutida a visão dos solos ao longo do tempo e como o conceito de paisagem pode contribuir para se pensar os solos na atualidade. Em seguida, foi analisada de forma crítica o papel dos solos nas principais estruturas gerais e de SE do solo. Ainda, se discutiu o que são os SE do solo e seus conceitos associados - propriedade, processo e função do solo. Por fim, com base na revisão realizada é proposto uma estrutura conceitual com uma lista das propriedades do solo, processos do solo, funções do solo, SE do solo e conexões com os ODS's.

No capítulo 2, foi realizada uma revisão sistemática com o objetivo de avaliar o estado da arte dos SE do solo em regiões tropicais de forma a orientar pesquisas futuras e estimular uma visão crítica mais robusta sobre a avaliação e valoração dos serviços do solo. Para isso, foram extraídas as seguintes informações: ano de publicação, país, localização dos estudos (coordenadas), se os SE do solo foram abordados de maneira correta (seguindo a estrutura conceitual do capítulo 1), qual SE do solo abordado e sua classificação (regulação, provisão e cultural – de acordo com a estrutura conceitual do capítulo 1) e se realizou valoração.

O capítulo 3 teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes técnicas no plantio de mudas para a recuperação ambiental e sua consequente influência na qualidade do solo e provisão do SE de estoque de carbono, em área de restauração na Mata Atlântica Brasileira. Além disso, o SE de estoque de carbono foi valorado. As técnicas utilizadas no plantio foram o biocarvão, calcário e hidrogel. Visitas periódicas para monitorar a sobrevivência e coletar solos foram realizadas. Foi avaliado a sobrevivência das mudas e parâmetros do solo para aferir se houve melhorias em sua qualidade.

Capítulo 1 – Estrutura conceitual para orientar estudos e gestão dos serviços ecossistêmicos do solo

1. Introdução

A interação dos elementos da natureza no decorrer do tempo resulta em modificações na paisagem em diferentes escalas e níveis de impacto (KONDOLF et al., 2014). A influência humana nas paisagens tem apresentado efeito considerável, alterando os fluxos de água, sedimentos e nutrientes nos ecossistemas em uma escala que excede os fluxos naturais (SYVITSKI et al., 2005). Esse desequilíbrio resulta na crise global atual, com escassez de recursos, diminuição da capacidade do planeta em absorver resíduos, degradação dos Serviços Ecossistêmicos (SE), erosão dos solos, entre outros (ROBINSON et al., 2012; STEFFEN et al., 2007). Essa expressiva e intensa influência do homem na paisagem, que tem alterado significativamente o clima do planeta, caracteriza para alguns o período geológico atual como antropoceno (STEFFEN et al., 2007; SYVITSKI et al., 2005; ZALASIEWICZ et al., 2011).

As paisagens atuais refletem um momento de crise da relação natureza humana e não humana. Esses momentos de crise devem movimentar mudanças e inspirar novos caminhos de desenvolvimento humano no século XXI. Os novos caminhos devem conciliar produção agrícola, paisagem comum no antropoceno, e preservação e conservação da biodiversidade (SANTOS et al., 2021). Além disso, devem se basear no constante diálogo e comunicação entre a sociedade, ciência e instituições públicas e privadas, com o objetivo de ajudar a tornar mais consciente a importância dos recursos naturais indispensáveis para o bem-estar humano (BAVEYE et al. 2016; LATAWIEC et al., 2020).

O conceito dos SE nasce na década de 80 do século passado para ajudar nesse processo. Este foi apresentado pela primeira vez em um livro dedicado a discutir a dependência da civilização humana dos benefícios prestados pelos ecossistemas (EHRlich et al., 1981). O conceito levou anos para permear a comunidade científica, sendo somente no início do

século XXI que ele começou a ser mais utilizado (BAVEYE et al., 2016). A partir deste período, foi sendo reconhecido como um conceito chave para impulsionar o diálogo entre ciência e tomada de decisão, para destacar a importância dos ecossistemas para as necessidades humanas, e para ajudar a traduzir os resultados científicos em um formato relevante para a governança ambiental e políticas públicas (MEA, 2005; TEEB, 2010; TURNER et al., 2008).

Diversas estruturas conceituais gerais sobre os SE foram desenvolvidas, sendo a mais emblemática a do *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA), no ano de 2005. Nos anos seguintes outras estruturas gerais foram elaboradas (e.g. HAINES-YOUNG et al., 2018; TEEB, 2010; TURNER et al., 2008). Além disso, o conceito de “Contribuição da Natureza para as pessoas – CNP” surgiu, de forma a ampliar o conceito de SE (DÍAZ et al., 2018; PASCUAL et al., 2017), incluindo todas as formas de contribuições da natureza, positivas ou negativas e baseando-se não somente nas ciências naturais e econômicas como também no papel de diferentes culturas e conhecimentos tradicionais. No entanto, uma questão consensual são os solos e seus serviços/contribuições para as pessoas, terem sido negligenciados e pouco discutidos ao longo dessas publicações gerais (ADHIKARI et al. 2016; DOMINATI et al., 2010; HEWITT et al., 2015).

Devido a tais simplificações do papel dos solos na temática de SE, esse estudo tem por objetivo aprimorar a discussão dos SE do solo e elaborar uma estrutura conceitual baseada na revisão de diferentes estruturas gerais e de solos publicados nos últimos anos. O intuito é que essa nova ferramenta sirva de apoio para os estudos futuros de SE do solo e ajude a complementar de informações relatórios importantes a tomada de decisão como por exemplo, os próximos relatórios temáticos de “degradação da terra e restauração” do *Intergovernmental Science-policy platform for biodiversity and ecosystem services* (IPBES).

O presente estudo aborda na sessão 1.1 a percepção dos solos na literatura ao longo do tempo e como o conceito de paisagem pode contribuir para se pensar os solos na atualidade numa perspectiva holística. Em

seguida, na sessão 1.2 se analisa de forma crítica o papel dos solos nas estruturas gerais e específicas de SE. A sessão 1.3 apresenta o que são os SE do solo e seus conceitos associados – funções do solo, propriedades do solo e processos do solo. Por fim, a sessão 1.4 apresenta com base na revisão, a estrutura conceitual de SE do solo, para ajudar a orientar futuros estudos.

1.1 - Percepção dos solos ao longo do tempo e sua integração ao conceito de paisagem

Por volta de 30 mil anos atrás os seres humanos pré-históricos viam o solo como uma base para a locomoção, como local para o crescimento de vegetais, frutos silvestres, barro para o fornecimento de cerâmicas, e pigmentos como matéria-prima importante para as suas pinturas rupestres. Nesse período, os seres humanos tinham pouca ou nenhuma preocupação com a origem e propriedades do solo (LEPSCH, 2010). Foi no início do Holoceno, por volta de 11,65 mil anos atrás, que a espécie humana disseminou a agricultura com produção de excedentes, resultando assim em uma maior atenção para os solos do ponto de vista produtivo (BOIVIN et al., 2016). A partir desse período, os solos começam a ser, portanto, percebidos como provedores de serviços de provisão e culturais (Figura 1).

Um exemplo de destaque se dá na região amazônica, onde solos guardam informações valiosas sobre a forma como populações passadas, de até 10 mil anos atrás, se relacionavam com a terra (REBELLATO et al., 2009; WOODS, 2009) (Figura 1). Esses locais são conhecidos como as Terras Pretas de Índio da Amazônia (TPI), que hoje são objeto de estudo de pesquisa interdisciplinar, principalmente pela fertilidade conferida a esses solos quando comparados com os das áreas adjacentes, que em geral são pobres e intemperizados (DEMETRIO et al., 2019; GLASER, 2001; KERN et al., 2017; NOVOTNY et al., 2009). Diversos artefatos podem ser encontrados nesses solos, como cerâmicas, ossos de peixe e de animais de caça, revelando muitas informações culturais de povos

passados, que estavam escondidas na paisagem amazônica (NEVES et al., 2003). Esses solos trazem ensinamentos valiosos para atualidade de como melhorar atributos químicos, físicos e biológicos dos solos e também o manejo de resíduos, revelando que o manejo dos solos já fazia parte da cultura das populações humanas que ali viviam em tal período histórico.

Documentos de aproximadamente 3 mil anos atrás indicam que os egípcios desse período já haviam iniciado uma metodologia de classificação dos solos, na qual terras mais férteis custavam três vezes mais do que os demais solos. Na China, à cerca de 2.500 anos atrás, existem evidências que sugerem que havia um sistema de classificação do solo utilizado para cobrar impostos com base na produtividade do mesmo (HARRISON et al., 2010; KRASILNIKOV et al., 2010). Já na Rússia, um levantamento sistemático a partir do conhecimento popular dos solos ocorreu no século 16 e livros foram criados com as avaliações dos solos do seu território. Os livros foram organizados por meio de entrevistas com camponeses sobre a qualidade e a produtividade de suas terras (KRASILNIKOV et al., 2010). Portanto, é perceptível que o serviço ecossistêmico de provisão de alimentos motivou um maior conhecimento sobre os solos, contribuindo também para maior provisão de serviços culturais associados ao conhecimento (Figura 1).

Os solos estão presentes também nos textos bíblicos católicos. O nome hebraico “*Adama*” significa terra ou solo, e derivou o nome de um dos principais personagens desta religião, conhecido como o primeiro homem na Terra. Tal nome vincula a existência dos seres humanos e sua sobrevivência ao solo, ao qual estão conectados por toda a vida. O nome hebraico “*Hava*”, que deriva Eva, significa vida ou doação de vida. A conexão entre Adão e Eva faz alusão a dependência da vida humana de todos que nasceram depois deles – dos solos terrestres (HILLEL, 2011).

O solo é recurso necessário à vida humana pois é a base de produção da maioria dos alimentos. Diante desse fato, por volta de 1840-1850, o cientista e químico alemão Justus Von Liebig publicou os primeiros estudos científicos relacionados à agronomia (VAN DER PLOEG et al.,

1999) (Figura 1). Nessas obras, se relatou importantes informações como a dependência de plantas por água e também sobre compostos químicos simples do solo. Tais constatações, refletiram na aplicação de fertilizantes minerais no solo com o objetivo de aumentar as colheitas. No entanto, os estudos desenvolvidos por Justus Von Liebig e seu grupo foram realizados em estufas, ou seja, ambientes controlados, sem considerar a realidade sistêmica dos solos, resultando em muitos testes em campo sem sucesso (Lepsch, 2010).

No final do século XIX, o naturalista e geógrafo russo Vasily V. Dokuchaev observou que o solo não era um simples amontoado de material geológico e sim o resultado da interação de diferentes fatores como clima, organismos, topografia, material parental e tempo (JOHNSON et al., 2015; figura 1). Dokuchaev descreveu os solos compostos por uma sucessão de diferentes camadas horizontais com início na superfície onde se baseiam as plantas e fim na rocha matriz. Foi esse naturalista que estabeleceu os fundamentos da pedologia (LEPSCH, 2010). O olhar de Dokuchaev para os solos trouxe uma perspectiva integrada de diversos fatores presentes na paisagem que ajudam a formar os solos.

As contribuições desses cientistas ajudaram a fundar a ciência do solo e contribuíram para o aumento da produtividade agrícola, principalmente na segunda metade do século XX. Esse período ficou reconhecido como Revolução Verde, devido à invenção e disseminação de um conjunto de práticas agrícolas que impulsionaram o aumento da produção (Figura 1). Ao longo de tais anos, foi possível triplicar o volume de alimentos em diversas partes do mundo por meio de um pacote tecnológico composto por: maquinaria, sementes selecionadas, fertilizantes, agrotóxicos e irrigação (PIRES, 2007). Essas novas técnicas no campo, transformaram paisagens em diversas partes do planeta com a implementação de sistemas de monoculturas para a produção de trigo, soja, milho, entre outros. Contudo, a aplicação em larga escala e de forma mal planejada de tais técnicas exigiram cada vez mais da capacidade produtiva dos solos, comprometendo sua saúde e funcionamento. O esgotamento da capacidade produtiva dos solos através do manejo

inadequado criado com a Revolução Verde é uma realidade identificada nos últimos anos. Um estudo indicou que entre 24% a 39% das áreas de cultivos de milho, arroz, trigo e soja no mundo, os rendimentos comparados com os anos iniciais de implementação do sistema estagnaram ou entraram em colapso (RAY et al., 2012).

Ainda mais recentemente, a relação dos solos com as mudanças climáticas tem sido reportada na literatura científica (BAVEYE, 2020; Figura 1). Sistemas produtivos com solos esgotados foram responsáveis por até 29% das emissões globais de gases do efeito estufa no ano de 2012, devido a monoculturas, pecuária e desmatamento de terra para acomodar essas atividades (VERMEULEN et al., 2012). Práticas de manejo como sistemas agroflorestais e integração agrosilvipastoris tem emergido como alternativas alinhadas ao combate às mudanças climáticas.

Os sistemas produtivos convencionais têm utilizado e reconhecido os solos como provedor de alimentos, ignorando toda sua realidade sistêmica e integração com diferentes elementos da paisagem. Nessa perspectiva, é importante incentivar que pesquisas sobre solos e práticas de manejo da terra estejam associadas a ideia/conceito de paisagem, definido aqui como uma associação de elementos da natureza humana e a presença humana no espaço, que devem ser analisados de forma integrada e dinâmica (SANSOLO, 2007).

Outro importante entendimento sobre a paisagem necessário para mudar o cenário de uso da terra, é observá-la como herança. A paisagem de hoje é herança de processos fisiográficos, biológicos e patrimônio coletivo de povos que historicamente as herdaram como território de atuação de suas comunidades. O conceito reflete a herança de processos de atuação antiga, que foram remodelados e modificados por processos de atuação recente derivados da natureza humana e não humana (AB'SÁBER, 2003). Associando os solos a essa perspectiva do conceito de paisagem, faz-se necessário a sociedade atual pensar que solos como herança querem deixar para as gerações futuras.

Abordar os solos na perspectiva da paisagem é propor reflexões sobre o uso que o ser humano faz dos solos e seu efeito para diferentes elementos da natureza em diversas escalas espaciais e tempo. Do mesmo modo, é refletir sobre o efeito de diferentes elementos da natureza não humana no solo, e quais os reflexos disso na vida humana. É também abandonar o paradigma anterior da ciência do solo de resolver problemas pontuais de redução de safras, para tentar resolver problemas que são de desafios globais. A falta desse olhar holístico tem sido uma grande preocupação para alguns cientistas do solo na atualidade (LAL et al., 2021). Os solos sob a perspectiva da paisagem, demanda um diálogo com outras disciplinas e com a sociedade.

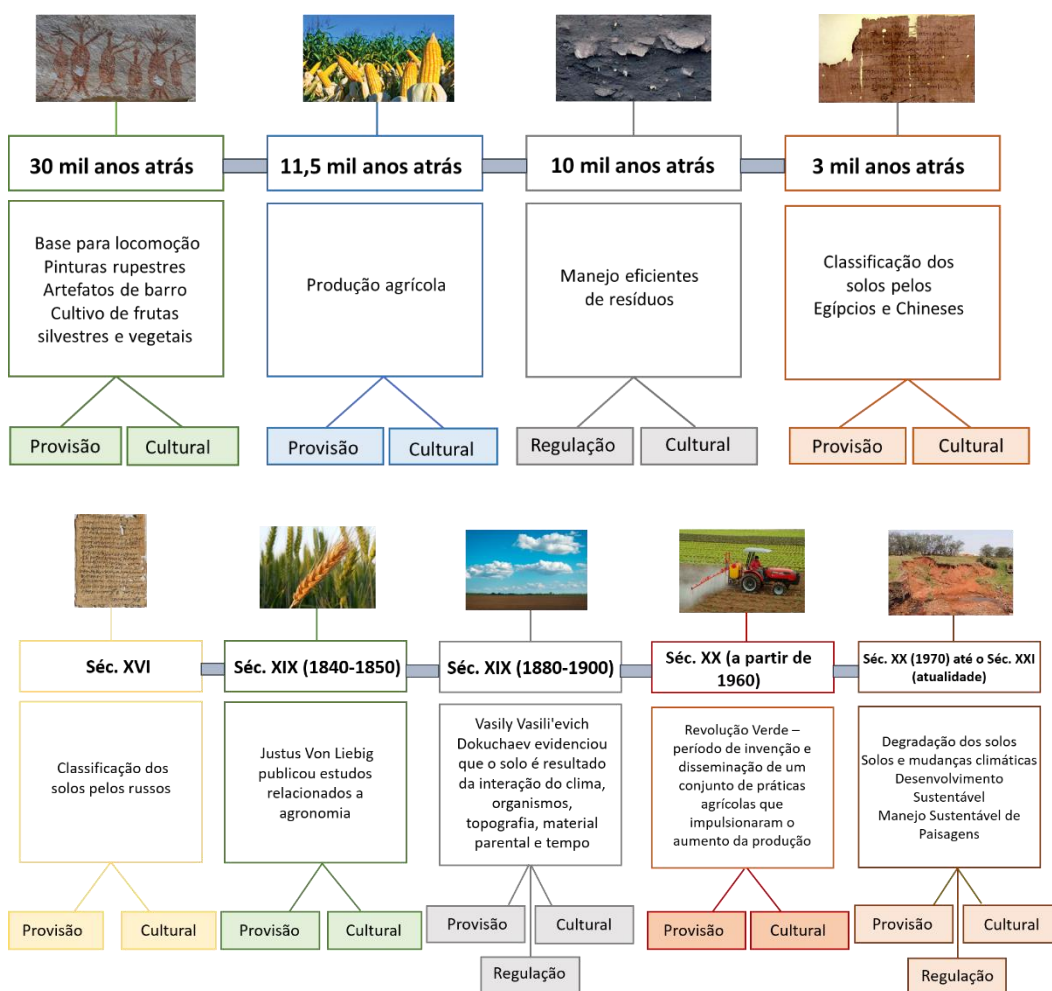


Figura 1 – Linha do tempo sobre alguns marcos na ciência do solo e sua relação com os serviços ecossistêmicos do solo de regulação, provisão e cultural

1.2 - Os solos nas estruturas de serviços ecossistêmicos gerais e específicas

O termo “serviço ecossistêmico” surgiu pela primeira vez na década de 80 do século passado, em trabalhos publicados pelos pesquisadores Paul Ehrlich, Anne Ehrlich e Harold Mooney (EHRlich; ANNE, 1981; EHRlich; MOONEY, 1983). Surge para promover um melhor diálogo entre ciência e tomadores de decisão e reduzir a degradação dos ecossistemas. No entanto, nessas obras, não se apresentou uma definição sobre o conceito. Os serviços foram utilizados e conectados a concepção de funções da natureza, e atrelado a ideia de que conservando os ecossistemas, conservamos também as funções e serviços prestados (GÓMEZ-BAGGETHUN et al., 2010).

Em 1997, o conceito foi definido por Gretchen Daily em sua obra “*Nature’s Services: Societal Dependence On Natural Ecosystems*”, como as condições pelos quais os ecossistemas naturais e as espécies que os constituem, sustentam e realizam a vida humana. Os serviços ecossistêmicos foram definidos como responsáveis por manter a biodiversidade e classificados como bens do ecossistema como madeira, produtos farmacêuticos, forragens, entre outros (DAILY, 1997). No mesmo ano, Robert Costanza, definiu os SE como os benefícios que as populações humanas derivam, direta ou indiretamente, das funções do ecossistema. Nessa obra, os SE foram estabelecidos como fluxos de materiais, energia e informações a partir do estoque de capital natural combinado com serviços de capital humano e manufaturado para produzir bem-estar humano. Um dos grandes resultados desse estudo foi que o valor de toda a biosfera foi estimado de uma média de U\$33 trilhões por ano. A lista de SE presente nesse estudo, apresentou poucos exemplos de serviços que o solo tem capacidade de prover (Tabela 1).

No ano de 2002, Rudolf De Groot e colaboradores desenvolveram uma estrutura para descrever, classificar e valorar funções, bens e os SE. Nessas estruturas, os SE e bens foram reportados como derivados das

funções ecossistêmicas e apresentaram um caráter antropocêntrico. Foram classificados em regulação, habitat, produção e informação. Poucos SE do solo apareceram na listagem dessa estrutura, demonstrando limitada atenção ao potencial desse recurso natural (Tabela 1). Pouco tempo depois, no ano de 2005, foi lançado o relatório do *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA), que representou o esforço de 1.300 cientistas de diversos países para ajudar a fornecer base de conhecimento para tomada de decisão (MEA, 2005). Inspirado nos trabalhos anteriores, como o de De Groot, esse relatório definiu os SE como os benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas e os categorizou em serviços de suporte, provisão, regulação e cultural. A estrutura do MEA se configura como um dos mais emblemáticas na temática dos SE.

Alguns anos depois, foi publicado em 2010 o relatório do *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (TEEB), que definiu os SE como as contribuições diretas e indiretas dos ecossistemas para o bem-estar humano. Esse trabalho, buscou promover uma melhor compreensão do valor econômico fornecido pela biodiversidade e SE e também destacou a importância de ferramentas econômicas que levem tais valores em consideração (TEEB, 2010). No TEEB, os SE foram categorizados em provisão, regulação, culturais e serviços do habitat. Ao contrário do MEA, o TEEB remove os serviços de suporte por defender que são processos que estão encarregados do funcionamento dos ecossistemas e que não são propriamente serviços. Assim como as outras estruturas, os SE do solo foram poucos contemplados na listagem elaborada pelo TEEB (Tabela 1).

O *Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES) foi desenvolvido em 2009 e definiu os SE como contribuições que os ecossistemas fazem para o bem-estar humano. Esse sistema de classificação foi criado para se conectar e ser compatível com outros sistemas de classificação utilizados na contabilidade ambiental integrada (*System of Environmental and Economic Accounting* - SEEA). Os SE foram categorizados nesse sistema em provisão, regulação e manutenção, e cultural (HAINES-YOUNG et al., 2010; HAINES-YOUNG et al., 2018). Assim como o TEEB, também não abordou o serviço de suporte do MEA.

Apresenta um sistema hierárquico de classificação em que as principais divisões são biomassa, água, material genético, entre outros, com destaque para a ausência dos solos nessa divisão. Em relação aos SE do solo são mencionados a liberação de nutrientes inorgânicos em campos cultivados, a decomposição de resíduos vegetais e a fixação de N por leguminosas (HAINES-YOUNG et al., 2018; tabela 1).

O sistema de classificação da *Intergovernmental Science-Policy Platform for Biodiversity and Ecosystem Services* (IPBES) foi publicado em 2015 (DÍAZ et al., 2015) e incluiu os SE dentro da definição de “benefícios da natureza para as pessoas”. Atualmente, o IPBES utiliza o conceito de “contribuição da natureza para as pessoas” (CNP), que possui uma definição mais abrangente no sentido de entender que a natureza não humana pode fornecer benefícios e também malefícios aos seres humanos (PASCUAL et al., 2017). Os solos compõem uma das categorias da CNP, denominada como “formação, proteção e descontaminação dos solos e sedimentos” (IPBES, 2019) (Tabela 1). Além disso, os solos têm obtido destaque nos relatórios temáticos do IPBES, como a elaboração do *Land degradation and restoration*.

Tabela 1 – Resumo dos estudos emblemáticos sobre serviços ecossistêmicos e como os serviços do solo foram mencionados

Autores	Serviços do solo
Costanza et al., 1997	Controle de erosão, retenção de sedimentos e formação do solo
De Groot et al., 2002	Manutenção de terras aráveis, prevenção de danos por erosão / assoreamento, manutenção da produtividade em terras aráveis, manutenção de solos produtivos naturais, manutenção de solos saudáveis e ecossistemas produtivos
MEA, 2005	Regulação da erosão e formação do solo
TEEB, 2010	Produção de alimentos, tratamentos de resíduos, prevenção contra erosão e manutenção da fertilidade do solo
CICES, 2010	Liberação de nutrientes inorgânicos em campos cultivados, decomposição de resíduos vegetais, fixação de N
Díaz et al., 2015 / IPBES	Formação, proteção e descontaminação de solos e sedimentos

A ausência de informações detalhadas sobre os SE providos pelos solos no desenvolvimento de estruturas gerais, resultou na publicação de estruturas focadas nos solos (ADHIKARI et al., 2016; BAVEYE et al. 2016; DOMINATI et al., 2010; HEWITT et al., 2015). Inspirado na estrutura conceitual do MEA em 2010 surgiu a primeira estrutura de SE voltado para solos (DOMINATI et al. 2010). Esse trabalho foi um marco pois definiu conceitos, discutiu a formação, funcionamento e classificação do solo, e por fim desenvolveu uma estrutura conceitual para classificar o solo e seus SE. Os SE do solo devem ser compreendidos como um conjunto de fluxos decorrentes dos estoques de capital natural que geram produtos importantes para atender as necessidades humanas (DOMINATI et al., 2014). Para se entender o funcionamento desses serviços é necessário se investigar esses fluxos. Ao contrário da estrutura conceitual do MEA (2005) que dividiu os SE em quatro categorias, Dominati et al. (2010) classificou os SE do solo em três categorias: serviços culturais, serviços de regulação e serviços de provisão. O SE de suporte do MEA (2005) foi definido como processo de suporte na estrutura para solos.

Outros estudos de proeminência buscaram através de revisões da literatura apresentar o status, tendências e desafios sobre a pesquisa de SE do solo. Adhikari et al. (2016), investigou os solos e os SE por meio de um diagrama que conceituou a conexão das principais propriedades do solo aos SE por meio das funções do solo. Evidenciou as principais propriedades do solo e suas conexões com os SE listados. Jónsson et al. (2016), apresentaram exemplos de como os SE do solo podem ser classificados e valorados usando métodos econômicos. Baveye et. (2016) destacou que existe um grande interesse dos cientistas do solo em compreender melhor as funções e serviços do solo. No entanto, a valoração monetária ainda desperta pouco interesse de alguns pesquisadores devido a ideologias contra o mercado (BAVEYE et al., 2016). Em todos os estudos destaca-se o crescente interesse da temática, principalmente após 2005 com a divulgação do relatório do MEA.

Com foco na comunicação sobre o valor do solo e os SE prestados, Latawiec et al. (2020) desenvolveu uma estrutura com estratégias de

comunicação para diferentes atores envolvidos no uso da terra. O plano estratégico foi elaborado com base no exemplo brasileiro, mas pode ser ajustado para diferentes países de acordo com os cenários locais. A abordagem da avaliação dos SE, valoração não monetária e monetária, e em seguida, a comunicação utilizando o plano estratégico, são etapas que contribuem para elucidar o valor do solo e a gestão adequada da terra.

1.3 - Serviços do solo e seus conceitos associados – funções, propriedades e processos do solo

A temática dos SE nasceu dos esforços de parceria principalmente entre as disciplinas como ecologia e economia (BAVEYE et al., 2016). O debate sobre as abordagens econômicas e a definição de diversos conceitos de início não foram consensuais (FISHER et al., 2009). O próprio conceito de SE foi definido de diferentes formas ao longo do tempo, como por exemplo, “condições e processos através dos quais os ecossistemas naturais e as espécies que os constituem, sustentam e realizam a vida humana” (DAILY, 1997); e “benefícios que as pessoas obtêm dos ecossistemas” (MEA, 2005).

Da mesma forma, o conceito dos SE do solo tem sido definido e utilizado de formas diferentes em disciplinas (DOMINATI et al. 2010) e em alguns estudos, sem definição (ALTHOFF et al., 2016; DOMINGUEZ-HAYDAR et al., 2011; KERFAHI et al., 2014). Em alguns casos se confundem com conceitos associados, como funções, propriedades e processos do solo. A definição dos conceitos em qualquer projeto de pesquisa é uma etapa muito importante, pois permite a caracterização da ideia que se deseja aprofundar e a definição de limites e possíveis sobreposições de ideias.

Um dos conceitos mais conectados ao de SE do solo são as propriedades do solo, definidas aqui como um conjunto de características físicas, químicas e biológicas que um solo apresenta. São frequentemente quantidades mensuráveis que permitem os cientistas comparar os solos

(DOMINATI et al., 2010). As propriedades físicas são, por exemplo, densidade, infiltração e textura; as químicas, pH, potássio e capacidade de troca catiônica; e as biológicas, biomassa microbiana, minhocas e respiração do solo (BÜNEMANN et al., 2018).

Os processos do solo são entendidos como a transformação de insumos em produtos. É a ação continuada, sequência contínua de operações, que apresentam certa unidade ou que se reproduzem com certa regularidade, andamento, desenvolvimento (OXFORD, 2019). Os processos do solo estão divididos em processos de suporte como decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e de água; e também como processos de degradação, tais como compactação, erosão, impermeabilização, salinização e toxificação do solo (DOMINATI et al., 2010).

O solo possui múltiplas funções desempenhadas simultaneamente e é comum na literatura associá-lo ao termo “multifuncionalidade” (SIMONSON, 1966). Esse conceito surgiu na década de 70 do século passado, definido como a capacidade de estoque dos solos em diferentes aspectos, importantes para diversos organismos e outras partes da paisagem (BAVEYE et al., 2016). As funções do solo foram definidas anos posteriores em cinco categorias, duas classificadas como sócio-econômicas e tecnointindustriais, e as três restantes como ecológicas. Nas funções sócio-econômicas temos a função do solo de prover matéria-primas como argila, areia e água direcionadas a operações de construções industriais e manufaturadas. Nas funções tecnointindustriais o solo provendo estrutura para edifícios, instalações e aterros sanitários. Nas funções ecológicas, temos a primeira de produção de biomassa em áreas agrícolas e florestais, fornecimento de estrutura físicas para raízes, ser substrato nutritivo, fornecer água, ar e nutrientes para o desenvolvimento das plantas; a segunda de filtrar contaminantes químicos e biológicos, como tampões físicos no ciclo hidrológico e como um meio de transformação biológica/biogeoquímicas de compostos orgânicos tóxicos; e a terceira função de preservação de diversos genes que podem ser usados por seres humanos para a produção de medicamento e também a preservação de

materiais arqueológicos e paleontológicos de alto valor para a história da humanidade (BLUM, 1995). Com o passar do tempo, a função ecológica relacionada à cultura e história foram transformadas em aspectos culturais e não ecológicos, sendo denominadas de “patrimônio geogênico e cultural” (BLUM, 2005). Além disso, foi criada uma nova função ecológica associada ao solo como reservatório de carbono. O que podemos perceber por exemplo, é a ausência da função espiritual dos solos (BAVEYE et al., 2016). Mesmo com limitações inerentes ao desenvolvimento de diversos conceitos, essas tentativas e discussões sobre as funções do solo merecem ser reconhecidas de forma positiva. A multifuncionalidade do solo tem sido utilizada como referência para o planejamento do uso da terra na União Europeia e na China, assim como tem sido utilizado por agências internacionais como a *Food and Agriculture Organization* – FAO (SCHULTE et al., 2014). Com base em todo esse histórico, as funções do solo são definidas no presente estudo como todos os benefícios que a natureza humana e não humana obtém dos solos (BAVEYE et al., 2016).

Os solos também provêm serviços. Na perspectiva da ciência do solo, os serviços são benefícios que as populações humanas derivam dos solos e correspondem a um subconjunto das funções do solo (BAVEYE et al., 2021). Semanticamente, a palavra "serviço" é definida como o fornecimento de algo de que as pessoas precisam (CAMBRIDGE, 2020). Os SE do solo podem ser entendidos como fluxos de estoques de capital natural do solo que beneficiam os humanos e podem ser classificados em regulação, provisão e cultural (DOMINATI et al., 2010). No presente estudo, optou-se pelo conceito de SE do solo, para evidenciar ainda mais a dependência que os seres humanos possuem dos recursos fornecidos pela natureza e impulsionar pesquisas na temática, visto que é um conceito que dialoga com tomada de decisão e economia.

1.4. Estrutura conceitual dos serviços do solo e conexões com os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável

O desenvolvimento de uma estrutura conceitual, inspirada nas diversas estruturas gerais e focadas no solo, que evidenciem a definição do conceito de SE do solo e dos demais associados se torna uma pauta necessária para uma melhor comunicação. A estrutura conceitual desenvolvida, parte da concepção de paisagem, visto que é uma unidade espacial multidimensional que instiga um pensamento sistêmico e, ao mesmo tempo, é uma categoria de análise que considera a interação dos elementos da natureza humana e não humana (BALÉE et al., 2006; CRUMLEY, 1994) (Figura 2). A gestão dos ecossistemas a partir da perspectiva da paisagem, possibilita abranger diferentes contextos ecológicos, sociais e políticos. Os estudos, projetos e pesquisas focados no solo precisam visualizar esse recurso natural como um elemento da paisagem como ponto de partida.

Os solos e seu universo de conhecimento, ganhou nos últimos anos o conceito dos SE do solo. A temática envolve diversas etapas, como a discussão do conceito, classificação / categorização dos serviços, avaliação, valoração e comunicação. Na presente estrutura conceitual, optou-se por demonstrar as diferenças entre o conceito dos SE do solo e os demais associados – propriedades do solo, processos do solo e funções do solo. Além disso, é possível verificar a categorização dos SE do solo, divididas em serviços de provisão, regulação e suporte. A lista de serviços relacionados aos solos também é apresentada (Figura 2).

As discussões sobre o conceito têm incentivado o financiamento de projetos de pesquisas de grande escala como o *Soil Transformations in European Catchments* (SoilTrEC), o *Ecological Functions and Biodiversity Indicators in European Soils* (EcoFINDERS) e o *Soil Services* (BANWART, 2011; EIP, 2013; ORGIAZZI et al., 2016). Esses projetos ajudaram também a desenvolver a ciência no que tange a quantificação das funções / serviços e ameaças do solo, e também conceber métodos e estratégias para

melhorar as funções / serviços do solo. Também forneceram apoio para os objetivos políticos da Estratégia Temática da União Europeia para a proteção do solo (EUROPEAN COMMISSION, 2012).

Como visto neste capítulo, existem diversas definições e diversos sistemas de classificação dos SE e dos SE do solo. Alguns tratam funções, processos e serviços de forma diferente, mas um consenso existe em compreender que os serviços estão diretamente ligados a fornecer benefícios ao homem (DÍAZ et al., 2015; MEA, 2005). As definições robustas em estudos, pesquisas e projetos são importantes para um entendimento maior dos leitores e também para a correta valoração. Todas essas etapas podem contribuir para a gestão sustentável de paisagens e ajudar a monitorar o cumprimento das metas dos Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS's).

Embora não exista um ODS dedicado aos solos, muitos estão relacionados direta e indiretamente a esse recurso natural e diversas metas só podem ser alcançadas com um olhar para os solos (KEESSTRA et al., 2016). Essa relação é percebida no ODS1 – erradicação da pobreza, ODS2 – fome zero e agricultura sustentável, ODS 3 – boa saúde e bem-estar, ODS 5 – Igualdade de Gênero, ODS 6 – água potável e saneamento, ODS 8 – trabalho decente e crescimento econômico, ODS 10 – redução das desigualdades, ODS 11 – cidades e comunidades sustentáveis, ODS 12 – consumo e produção sustentável, ODS 13 – ação contra a mudança global do clima, ODS 15 – vida terrestre, ODS 16 – paz, justiça e instituições eficazes e ODS 17 – parcerias e meios de implementação (tabela 2). Alguns desses ODS's dependem da produção de plantas e outros, por exemplo, de processos do solo (LAL et al., 2021). Para atingir as metas dos ODS's até 2030, é necessário focar na recuperação e conservação dos solos. Até o momento, os cientistas do solo não contribuíram para definir metas e indicadores para os ODS's junto às Nações Unidas (BOUMA, 2020; TÓTH et al., 2018). Alguns indicadores físicos, químicos e biológicos do solo foram inicialmente sugeridos em Tóth e colaboradores (2018), para serem aplicados numa estrutura de indicadores dos ODS's.

Tabela 2 – Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável e suas relações com os solos

Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável	Relação com o solo
ODS 1 - erradicação da pobreza	Garantia de acesso à terra e incremento de renda vindo da terra
ODS 2 - fome zero e agricultura sustentável	Garantia de acesso a alimento seguro, aumento da produção agrícola e renda de produtores, melhoria da qualidade da terra e investimento em infraestrutura rural
ODS 3 – boa saúde e bem-estar	Reduzir o número de mortes e doenças por contaminação e poluição do solo
ODS 5 - igualdade de gênero	Realizar reformas para garantir as mulheres direitos iguais de acesso a propriedade e controle sobre a terra
ODS 6 - água potável e saneamento	Melhorar a qualidade da água e proteger os ecossistemas
ODS 8 – trabalho decente e crescimento econômico	Atingir níveis mais elevados de produtividade da terra com diversificação, modernização e inovação, e promover políticas para o desenvolvimento que apoiem as atividades produtivas, geração de emprego decente, empreendedorismo, criatividade e inovação, e incentivar a formalização e o crescimento das micro, pequenas e médias empresas, inclusive por meio do acesso a serviços financeiros na agricultura
ODS 10 – redução das desigualdades	Alcançar e sustentar o crescimento da renda da população mais pobre que depende da terra pra viver
ODS 11 – cidades e comunidades sustentáveis	Acesso à habitação segura, adequada e a preço acessível
ODS 12 – consumo e produção sustentável	Alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais, incluindo os solos, alcançar o manejo saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, desenvolver e implementar ferramentas para monitorar os impactos do desenvolvimento sustentável para o turismo sustentável
ODS 13 – ação contra a mudança global do clima	Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mitigação, adaptação e redução de impacto nos recursos naturais, incluindo os solos, e alerta precoce da mudança do clima
ODS 15 – vida terrestre	Assegurar a conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e seus serviços, combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo
ODS 16 – paz, justiça e instituições eficazes	Desenvolver instituições eficazes, responsáveis e transparentes, garantir a tomada de decisão responsiva, inclusiva, participativa e representativa, e promover e fazer cumprir leis e políticas não discriminatórias para ações sustentáveis no solo
ODS 17 – parcerias e meios de implementação	Melhorar a cooperação internacional e o acesso à ciência, tecnologia e inovação, e aumentar o compartilhamento de conhecimentos sobre os solos, promover o desenvolvimento, a transferência, a disseminação e a difusão de tecnologias ambientalmente corretas sobre os solos para os países em desenvolvimento, operacionalizar plenamente a tecnologia a ciência, tecnologia e inovação para os países menos desenvolvidos, reforçar o apoio internacional para a implementação eficaz e orientada da capacitação em países em desenvolvimento, aumentar significativamente as exportações dos países em desenvolvimento incluindo produtos advindos da terra

A temática dos SE do solo, com métodos que envolvem a avaliação dos bens e serviços e também a valoração simboliza um caminho para se

verificar e monitorar se os ODS's estão sendo alcançados. Iniciativas e projetos na Europa que utilizam a temática dos SE do solo (mencionados acima) e estão alinhados aos ODS, já estão em andamento. Movimentos semelhantes em outras partes do mundo, incluindo a região tropical, e países como o Brasil, devem ser incentivados. Os solos são parte crucial no caminho para o desenvolvimento sustentável.

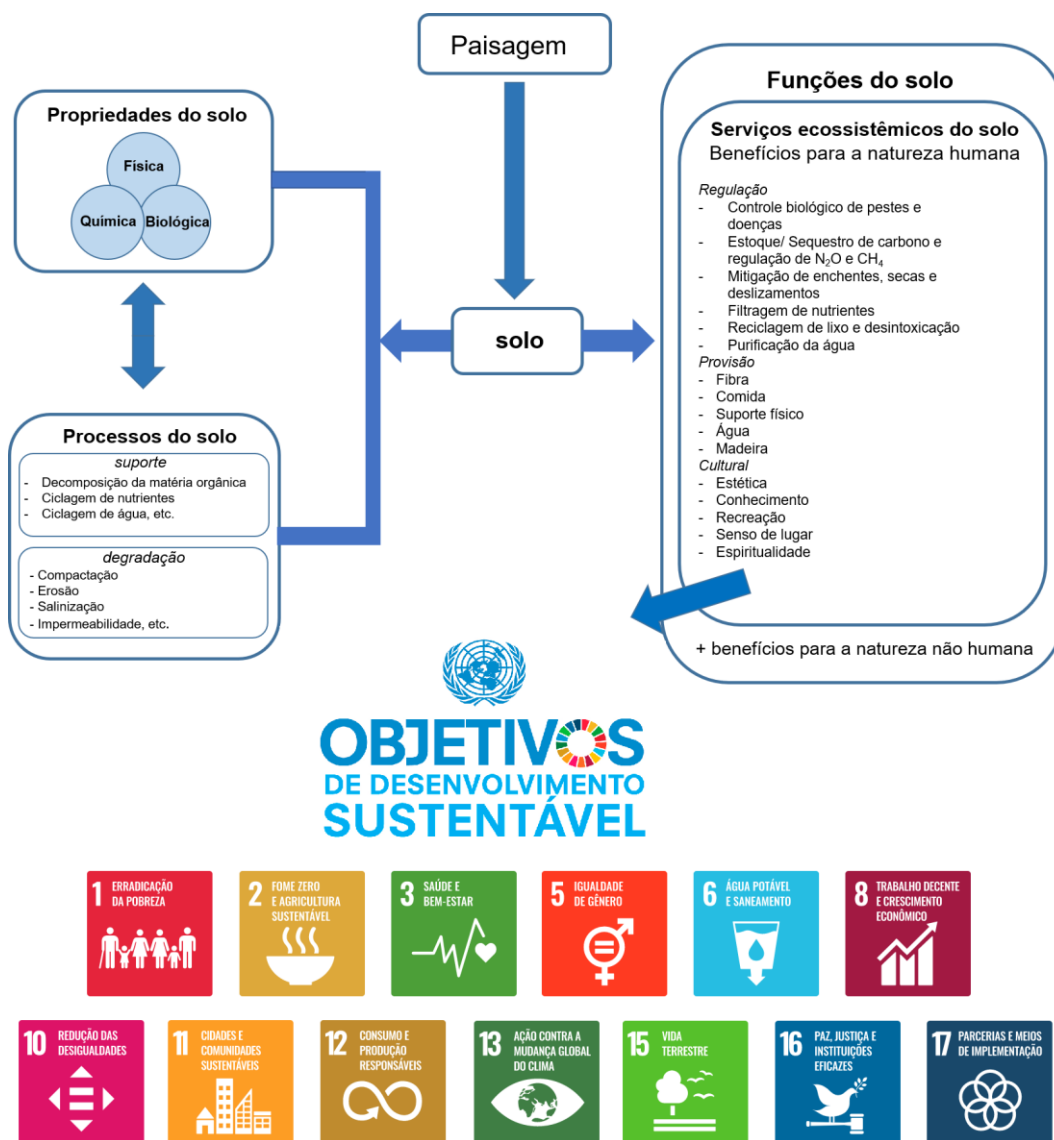


Figura 2 – Estrutura conceitual ilustrativa dos serviços ecossistêmicos do solo e seus conceitos associados – propriedades do solo, processos e funções do solo, e os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável relacionados aos serviços do solo. Esta estrutura é baseada em ideias contidas em Dominati et al., 2010; Robinson et al., 2013; Baveye et al., 2016; Baveye et al., 2020

2 – Conclusões

O solo é um recurso natural que tem sido reconhecido ao longo dos anos pela sua capacidade de provisão de diversos SE. A maximização da provisão de alguns serviços com manejo inadequado da terra tem contribuído para a degradação em diferentes escalas espaciais. Os solos são parte da paisagem, e seu desequilíbrio apresenta efeito negativo nos demais componentes humanos e não-humanos. Mesmo com toda a sua importância, tem sido degradado com frequência. A temática dos SE surge para ajudar a reverter esse cenário, destacando a importância do papel do solo para a vida dos seres humanos, sugerindo estratégias para se avaliar a provisão de SE, e instigando através dessas avaliações um melhor diálogo entre ciência e tomadores de decisão. No entanto, alguns desafios ainda existem, tais como imprecisões na utilização do conceito e de outros conceitos associados, como propriedades, processos e funções do solo. Nesse contexto, são necessárias maiores discussões. Além disso, a temática dos SE pode contribuir para ajudar a monitorar o cumprimento das metas dos ODS's, visto que muitos dos objetivos se relacionam com os solos.

Capítulo 2 – Revisão sistemática dos serviços ecossistêmicos do solo em regiões tropicais

1. Introdução

O solo é um recurso natural limitado, que fornece suporte a várias funções dos ecossistemas e serviços associados (FAO, 2015). Relacionados a diferentes escalas espaciais e temporais, em interfaces humanas e não humanas, sustentam uma conexão cultural entre solos, ecossistemas e vida (WOODS, 2009). Os solos sustentam a vida humana por meio da produção de alimentos, madeira, fibras e purificação de água, e apoiam o fornecimento de outros diversos serviços ecossistêmicos (SE) (BAVEYE et al., 2016; LATAWIEC et al., 2020; VICENTE-VICENTE et al., 2019). Ao reconhecer a degradação do solo e a importância dos solos na sustentação dos ecossistemas e da vida humana, os serviços prestados pelos solos têm sido o foco de discussões recentes na literatura científica (ADHIKARI et al., 2016; BAVEYE et al., 2016; DOMINATI et al., 2014; DOMINATI et al., 2010).

As abordagens dos SE surgiram no final do século passado para encorajar um melhor diálogo entre a ciência e a tomada de decisão, destacar a relação entre os ecossistemas e as necessidades humanas e para ajudar a traduzir os resultados científicos em um formato relevante para a governança ambiental e políticas públicas (BALVANERA et al., 2012b; ROBINSON et al., 2013). Diversos marcos conceituais com o objetivo de uma melhor compreensão dos SE foram desenvolvidos (COSTANZA et al., 1997; DE GROOT et al., 2002; MEA, 2005; PASCUAL et al., 2017). Estruturas conceituais ganharam força na literatura nos últimos anos e também geraram críticas quanto ao seu enquadramento antropocêntrico (SCHRÖTER et al., 2014). Um dos resultados deste desafio foi o desenvolvimento do conceito de contribuição da natureza para as pessoas (CNP) como uma forma mais abrangente de definição. O

conceito de CNP considera que a cultura desempenha um papel vital nas conexões entre as pessoas e a natureza não humana, e contribui para o senso de compreensão de que a natureza não humana pode trazer benefícios e danos aos seres humanos (DÍAZ et al., 2018; PASCUAL et al., 2014; SCHRÖTER et al., 2014). Nas estruturas que tratam de ambos os conceitos, os solos têm sido pouco discutidos e amplamente negligenciados (ADHIKARI et al., 2016; DOMINATI et al., 2010; HEWITT et al., 2015).

Uma revisão sistemática destacou que até 2008 o conceito de SE relacionado à qualidade do solo recebia menos atenção quando comparado à biodiversidade (VIHERVAARA et al., 2010). Nos últimos 10 anos, vários autores propuseram e desenvolveram estruturas conceituais e classificações de SE do solo (Figura 3) (BAVEYE et al., 2016; DOMINATI et al., 2014; DOMINATI et al., 2010; ROBINSON et al., 2013). Nestes trabalhos pioneiros, destaca-se a importância da definição do conceito de SE do solo. Uma questão sistêmica para se chegar a um consenso sobre a definição de SE do solo é que os serviços do solo têm sido usados como sinônimo de funções e processos do solo (DOMINATI et al., 2014; KEESSTRA et al., 2012). Essa imprecisão na definição do conceito tem dificultado esclarecer as diferenças com os outros conceitos. Semanticamente, a palavra "serviço" é definida como o fornecimento de algo de que as pessoas precisam (CAMBRIDGE, 2020). Por outro lado, "função" é o propósito de algo ou alguém, e "processo" uma série de mudanças conectadas (CAMBRIDGE, 2020; OXFORD, 2019). Os SE do solo podem ser entendidos como fluxos de estoques de capital natural do solo que beneficiam os humanos e podem ser classificados em regulação, provisão e cultural (DOMINATI et al., 2010). As funções do solo podem ser definidas como fluxos decorrentes de estoques de capital natural que beneficiam toda a natureza (humana e não humana) (BAVEYE, 2020). Além disso, serviços, funções e processos são limitados pelas propriedades do solo. Em geral, as propriedades são mensuráveis diretamente e expressam características químicas (por exemplo, pH), físicas (densidade e agregados) e biológicas (comunidades florais e

faunísticas). Os processos de solo são entendidos como a transformação de insumos em produtos, por exemplo, a decomposição da matéria orgânica em húmus, a compactação do solo que reduz a infiltração e promove o escoamento da água (DOMINATI et al., 2010). Serviço, função, processos e propriedades do solo estão resumidos na figura 3.

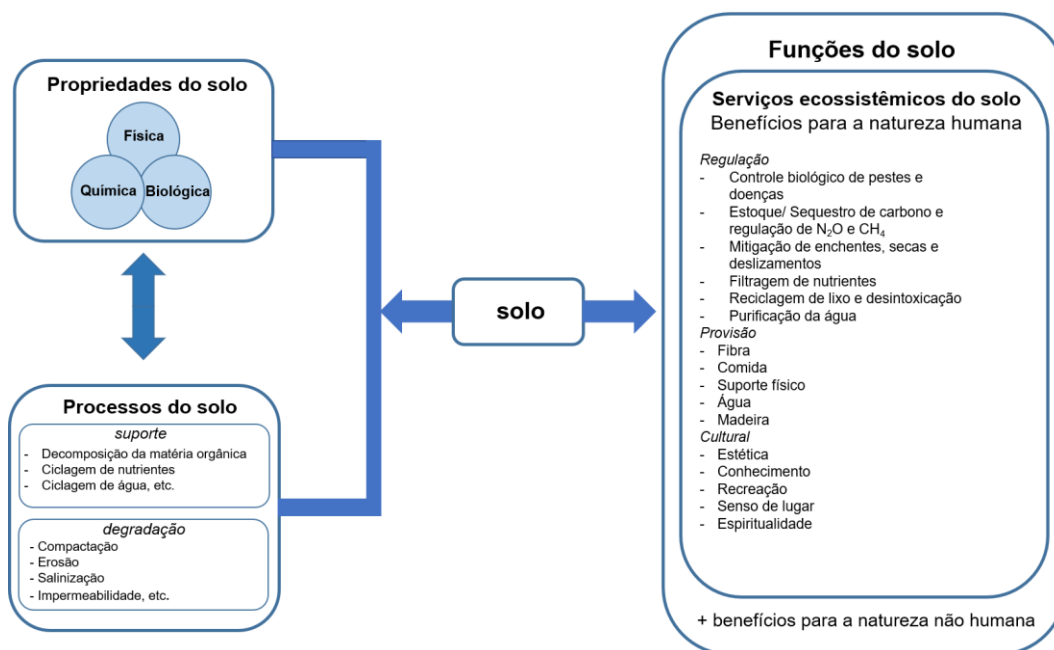


Figura 3 – Estrutura conceitual ilustrativa dos serviços ecossistêmicos do solo e seus conceitos associados – propriedades, processos e funções do solo. Esta estrutura é baseada em ideias contidas em Dominati et al., 2010; Robinson et al., 2013; Baveye et al., 2016; Baveye et al., 2020

A alta demanda por serviços prestados pelos solos transformou a paisagem global (FAO, 2015). Os ecossistemas naturais foram degradados e / ou substituídos pela produção agrícola, atividades de mineração e cidades (OLSSON, 2019). Os impactos dessas mudanças devem se agravar com o aumento da população global, que, segundo projeções das Nações Unidas, pode chegar a 9,7 bilhões de habitantes em 2050 (UN DESA, 2019). A gestão sustentável do solo, iniciativas de conservação e restauração, juntamente com a mudança dos hábitos de consumo da sociedade, é urgentemente necessária para garantir o fornecimento de SE do solo. A ausência de medidas efetivas para prevenir a degradação do solo levará à intensificação das mudanças climáticas, fome e a propagação

de doenças (BAVEYE et al., 2016; DOMINATI et al., 2010; LATAWIEC et al., 2020).

Importantes florestas tropicais, como a Amazônia, estão ameaçadas pelo desmatamento e fragmentação. Essas florestas geralmente abrigam populações tradicionais profundamente conectadas e dependentes dos recursos da floresta (ALVES-PINTO et al., 2018; CAMPOS-SILVA et al., 2016). Além disso, a região tropical abriga países (como Brasil, Índia e Indonésia) notáveis por sua produção de produtos agrícolas (FAO, 2013). O avanço da fronteira agrícola é frequentemente acompanhado pela degradação do solo e seus impactos ambientais e econômicos associados (LATAWIEC et al., 2015, 2014). Mudanças no uso e cobertura da terra e fortes chuvas na região tropical contribuíram significativamente para a erosão do solo (LABRIÈRE et al., 2015). Melhorar esse cenário socioecológico é um grande desafio social e político, pois os países da região tropical precisam acomodar o crescimento da população, segurança alimentar, desenvolvimento econômico, conservação de ecossistemas e provisão de SE (STRASSBURG et al., 2014). A abordagem dos SE do solo tem potencial para contribuir para mudar esse cenário de degradação do solo.

Por meio de uma revisão sistemática da literatura, avaliamos o estado da arte da SE do solo em regiões tropicais. A fim de orientar pesquisas futuras e estimular uma visão crítica mais robusta sobre a avaliação e valoração dos serviços do solo, este estudo identifica lacunas de conhecimento e problemas associados ao uso do conceito dos SE do solo na região tropical. Investigamos (i) como o conceito de SE do solo foi usado nos estudos acessados, (ii) como o SE do solo foram avaliados e valorados, e (iii) tendências na publicação ao longo do tempo e distribuição geográfica dos estudos.

2 - Material e métodos

A revisão sistemática da literatura foi realizada por meio das bases de dados *Web of Science* (WoS), Scopus e Scielo em busca de artigos publicados até abril de 2019. As seguintes combinações de palavras-chave foram utilizadas no mecanismo de busca avançado: TS (tópico) = (*ecosystem services AND soil AND tropical region*). Reconhecemos que o termo "região tropical" pode ter limitado a pesquisa, pois muitos artigos usam outros recortes espaciais (nomes de países, por exemplo) para definir suas localizações. No entanto, existem mais de 90 países na região tropical e considerá-los todos como termos de busca inviabilizaria esta revisão sistemática do ponto de vista prático. Todos os artigos encontrados foram lidos (n = 161). Os critérios para inclusão dos artigos na base de dados da revisão sistemática foram (i) artigos que considerassem regiões tropicais (23,27 ° Norte e 23,27 ° Sul); (ii) os artigos devem mencionar o termo "Serviços Ecossistêmicos"; (iii) os artigos devem ser sobre estudos focados no solo; e (iv) os termos SE e solo devem estar relacionados (apêndice 1). Os artigos que atenderam aos critérios foram exportados para Mendeley (n = 41) para extração de informações (Apêndice 1) (Figura 4).

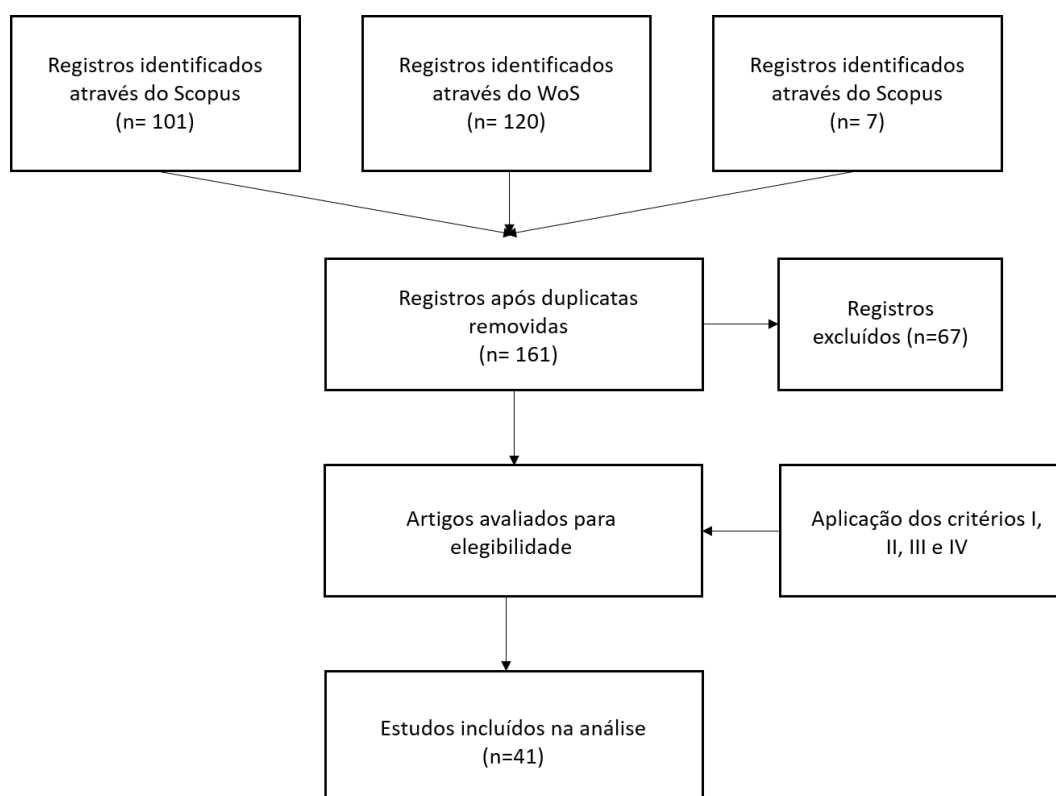


Figura 4 - Diagrama de fluxo da revisão sistemática

Reconhecemos que a discussão dos SE do solo pode ter sido explorada em outros artigos e na literatura cinza, que estão ausentes na base de dados avaliada nesta pesquisa (reconhecemos que isso representa uma limitação metodológica). Além disso, é provável que sejam publicados estudos que abordem o SE do solo que não apresentam os termos “serviços ecossistêmicos” conectados ao “solo”. Essas publicações não foram incluídas em nosso banco de dados por não utilizarem os termos que fazem parte do tema principal da pesquisa. Dos artigos baixados, foram extraídas as seguintes informações: ano de publicação, país, local dos estudos (coordenadas), se os SE do solo foram definidos como fluxos, quais SE do solo foram abordados e classificação do SE (regulação, provisão e cultural — Figura 2), métodos de avaliação do SE do solo e valoração (Apêndice 1). Todos os gráficos foram feitos usando o software SigmaPlot v. 14 Trial Version. O mapa foi feito no QGIS 3.4.4 para espacializar o número de estudos por países. A nuvem de palavras dos SE do solo mais citados nos estudos foi feita por meio do software WordArt.

3 - Resultados e Discussão

3.1. Classificação dos serviços ecossistêmicos do solo nos estudos de caso

Dos 41 artigos avaliados, 36 forneceram alguma classificação de SE do solo. Dentre eles, 17% (n = 7) dos estudos classificaram os SE do solo como serviços (entendido aqui como o fluxo de estoques de capital natural do solo benéfico para pessoas); 41% (n = 17) dos estudos classificaram SE do solo como serviços, processos, propriedades e funções do solo; 29% (n = 12) classificaram SE do solo como processos, propriedades e funções do solo e 12% (n = 5) referem-se aos artigos que relacionam o conceito de SE do solo a aspectos do solo que não se enquadram em nenhuma das categorias (Figura 5). Desde o seu surgimento, o conceito de SE tem enfrentado desafios para uma definição precisa (COSTANZA et al., 1997; DAILY, 1997; MEA, 2005; PASCUAL et al., 2017). A Economia dos Ecossistemas e da Biodiversidade (TEEB), por exemplo, retirou os serviços de suporte de sua estrutura por não beneficiarem diretamente a sociedade e os definiu como estruturas, processos e funções biofísicas (SUKHDEV et al., 2010). Como observado anteriormente, em muitos estudos, o termo SE do solo tem sido usado alternadamente com os termos função do solo e processos do solo (DOMINATI et al., 2010; VICENTE-VICENTE et al., 2019; WALLACE, 2007). Essa observação destaca a necessidade de se adotar uma definição clara e universal dos SE do solo.

Os SE do solo mais abordados nos estudos foram estoque de carbono (C) (n = 8), provisão de comida (n = 6), sequestro de C (n = 4), mitigação de inundações (n = 4), purificação da água (n = 4) e provisão de água (n = 4) - classificados como serviços de regulação e provisão (Figura 6). Estudos anteriores demonstraram que a transformação da paisagem e as mudanças climáticas podem afetar a região tropical de forma mais intensa, levando à perda da biodiversidade, causando chuvas mais intensas em certas regiões e afetando a produção de alimentos (UNDP, 2019; WILLIS

et al., 2009; ZIEMBICKI et al., 2016). Esse fato pode explicar a maior atenção dos estudos a esses SE do solo. Além disso, o interesse do mercado na oferta de alimentos, estoque e sequestro de C podem ter contribuído para um maior interesse por esses serviços. Em uma revisão em escala global do SE do solo, os autores também descobriram que a maioria dos serviços abrangidos eram os de regulação e provisão (ADHIKARI et al., 2016). Curiosamente, nenhum SE do solo cultural foi discutido com relação às regiões tropicais. Esta observação foi surpreendente dada a enorme diversidade de culturas em regiões tropicais e a presença de solos modificados antropogenicamente (por exemplo, Terras Pretas de Índio da Amazônia e solo modificado por fornos de carvão na Mata Atlântica brasileira) (NOVOTNY et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2011; RODRIGUES et al., 2018; SOLORZANO et al., 2016). Um baixo número de publicações referentes aos SE do solo culturais foi relatado em publicações anteriores (DOMINATI et al., 2010) e pode ser explicado pelo fato de que SE do solo é muitas vezes reconhecido como suporte a outros SE (VICENTE-VICENTE et al., 2019). Na discussão do SE, os serviços culturais foram os menos abordados na literatura (YOSHIMURA et al., 2017). Esta observação destaca a necessidade de uma abordagem de SE do solo holística que considere simultaneamente os vários serviços prestados pelo solo e o seu valor cultural.

Classificação dos SE do solo

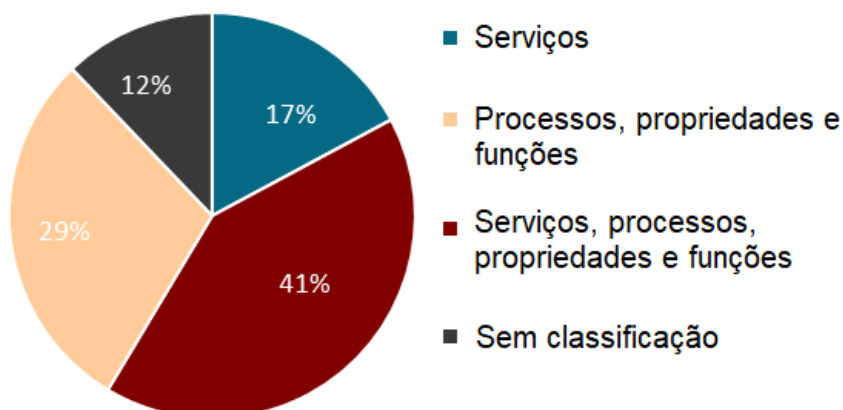


Figura 5 - Classificação dos serviços ecossistêmicos do solo de acordo com os artigos da base de dados

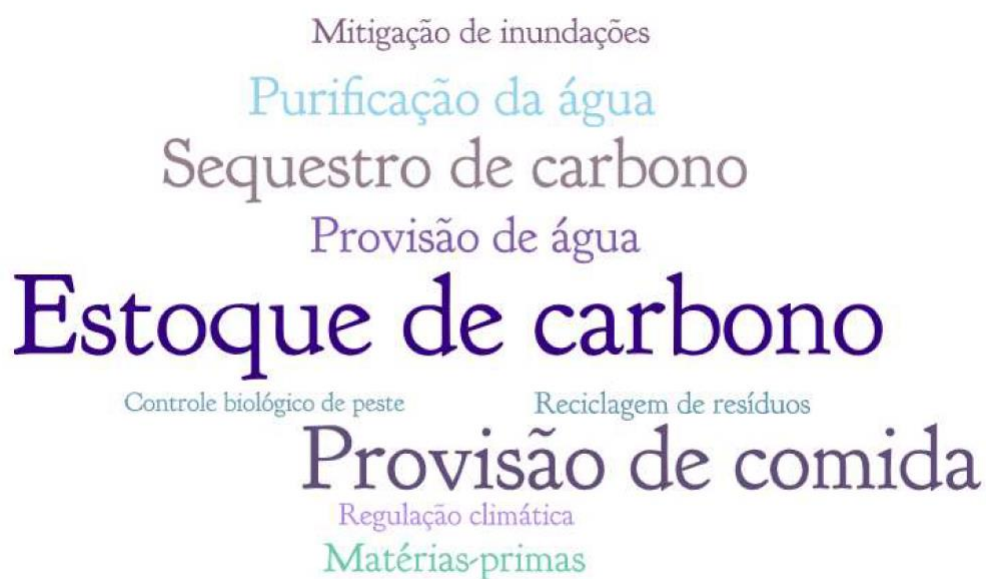


Figura 6 - Os serviços ecossistêmicos do solo mais abordados na revisão sistemática

3.2 - Avaliando e valorando os serviços ecossistêmicos do solo

A avaliação dos SE do solo em regiões tropicais foi proposta por oito estudos dos 41 analisados (tabela 3). Esses estudos mostraram diferentes interpretações do conceito de SE e do capital natural do solo. Alguns estudos ($n = 3$) avaliaram o SE de estoque de C do solo e realizaram medições do estoque de capital natural do solo (exemplo: C armazenado em amostras de solo coletadas; tabela 3). Os diagnósticos de solo baseados apenas em medições do capital natural do solo apresentam uma face da condição do solo e não o funcionamento do serviço. Outros estudos relataram modelos que simulavam os SE do solo com base em variáveis estáticas (por exemplo, informações sobre estoques de capital natural do solo, propriedades e processos) e variáveis dinâmicas (por exemplo, como as propriedades / processos variam temporalmente) (MINASNY et al., 2013; ROBINSON et al., 2013). Apenas um estudo em nosso banco de dados considerou variáveis dinâmicas (escala de tempo); neste caso, para medir a mitigação de inundações e estoque de C (ADOLFO CAMPOS et al., 2011). Ressalta-se que fora dos estudos incluídos na base de dados, diversas publicações voltadas para a região temperada, consideraram a avaliação dos SE do solo por meio de modelos (variáveis estáticas e dinâmicas), por exemplo: *Modelling soil ecosystem services* (MOSES) (AITKENHEAD et al., 2011), *soil carbon, aggregation, structure turnover* (CAST) (usado para o projeto SoilTrEC) (JÓNSSON et al., 2017; STAMATI; et al., 2013) e AgriPolis (BRADY et al., 2019; PITSON et al., 2020). Dada esta abordagem combinada, acreditamos ser essencial que estudos futuros que busquem avaliar os SE do solo em regiões tropicais considerem variáveis estáticas e dinâmicas.

Tabela 3 - Estudos, serviços ecossistêmicos do solo avaliados de acordo com os autores e descrição dos métodos

Referência	Avaliação do SE do solo	Caracterização do método
Ditt EH, et al., 2010	Infiltração da água	Modelagem
Lathuilliere MJ et al., 2017	Purificação da água e regulação climática	Modelagem
Maass JM et al., 2005	Provisão de comida	Entrevistas
Marichal R et al., 2014	Estoque de C	Uma visita de campo/análise de laboratório
Trilleras JM et al., 2015	Estoque de C e provisão de comida	Uma visita de campo/análise de laboratório
Campos A et al., 2011	Estoque de C e mitigação de inundações	Várias visitas de campo/análise de laboratório/modelagem
Chanlabut U et al., 2019	Estoque de C	Uma visita de campo/análise de laboratório
Wood SLR et al., 2016	Comida e madeira	Uma visita de campo/entrevistas

A valoração dos SE do solo na região tropical foi observada em três dos 41 estudos (LATHUILLIÈRE et al., 2017; PORTELA et al., 2001; WEN et al., 2019). Nestes estudos, serviços como purificação de água (LATHUILLIÈRE et al., 2017), plantação de borracha (WEN et al., 2019) e processos de solo como controle de erosão e ciclagem de nutrientes foram avaliados (PORTELA et al., 2001). Estudos que buscam valorar o estoque de C e o sequestro de C têm sido desenvolvidos, mas ainda não foram aplicados em regiões tropicais. Os métodos que estimam o valor econômico da regulação do clima são baseados em vários fatores, como o custo do sequestro de C em vários contextos com base no preço de mercado do C ou a disposição de pagar pelo aumento do sequestro de C no solo (JÓNSSON et al., 2016). Para a valoração do estoque de C no solo, Keith et al. (2019) propõe várias opções, incluindo “valor da terra”, “perda de estoque de C evitado” e “valor de um ativo fixo no balanço patrimonial” (KEITH et al., 2019). Muitos artigos sobre SE do solo publicados nos últimos anos abordam a ideia de atribuir preços aos serviços de solo, mas raramente propõem um número, nem sugerem métodos que podem ser usados para realizar a valoração (BAVEYE, 2020; ROBINSON et al., 2012).

Nesta área de avaliação e valoração quantitativa dos SE do solo, é necessário muito mais esforço. Recomendamos uma transição da avaliação do capital natural do solo e do processo para uma estrutura que destaca esses elementos considerando os múltiplos serviços prestados pelo solo. A avaliação do SE do solo pode contribuir para uma visão holística do uso da terra, com uma estrutura para avaliar sinergias e compensações, e uma lente através do qual se foca em soluções e políticas para otimizar o fornecimento do SE do solo.

3.3. Distribuição temporal e geográfica dos estudos de caso

O número de publicações sobre os SE do solo na região tropical aumentou nos últimos anos, especialmente nos últimos 6 anos (Figura 7). Essa observação segue a tendência mundial, na qual o interesse científico multidisciplinar pelo tema dos SE tem crescido, devido à atenção dada por governos e agências internacionais à conservação do solo como uma necessidade para o bem-estar humano (BAVEYE et al., 2016; IPBES, 2018). Uma revisão do conceito de qualidade do solo indicou que de 1970 a 2010, o conceito estava relacionado à produtividade do solo (principalmente para a agricultura) (BÜNEMANN et al., 2018). Atualmente, o conceito de qualidade do solo está relacionado ao fornecimento de SE e multifuncionalidade do solo (BÜNEMANN et al., 2018).

De todos os países localizados na região tropical, apenas 15 estudos conectaram os solos aos SE (Figura 7). Esse número relativamente baixo pode estar relacionado aos preconceitos associados a apenas um pequeno montante de financiamento para pesquisas direcionadas a SE do solo na região tropical; isso limita a aquisição de dados e restringe o tamanho do banco de dados com o qual apoia a avaliação do SE do solo (DE ALMEIDA, 2019). Na maioria dos países tropicais, existem estudos que classificam o SE do solo de forma inconsistente, ou seja, eles também classificam os SE do solo como propriedades, processos e funções (Figura 8).

Do total de 41 estudos avaliados, a região tropical do continente sul-americano apresentou o maior número de estudos de caso (Brasil = 8, Colômbia = 6 e México = 4) (Figura 8). Esse maior valor no Brasil ($n = 8$) pode estar relacionado ao seu papel como um dos maiores produtores agrícolas do mundo (UNITED NATIONS, 2019) e também ao crescente reconhecimento do conceito de SE no Brasil. Além disso, serviços ambientais promovidos por redes temáticas de pesquisa desenvolvidas nos últimos anos (PIRES et al., 2018), com ênfase na Rede Amazônia Sustentável (GARDNER et al., 2013), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Carteira de Serviços Ambientais da Embrapa (PRADO et al., 2016), Biota Fapesp (JOLY et al., 2010) e Plataforma Brasileira para Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES) (SCARANO et al., 2019) pode ter sustentado o número mais significativo de casos.

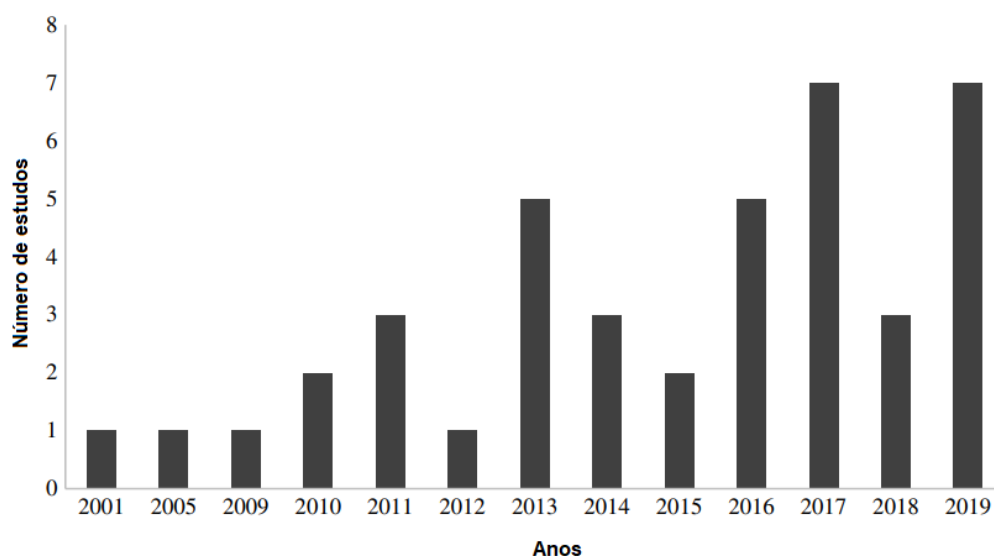


Figura 7 - Número de estudos relacionados aos serviços ecossistêmicos do solo ao longo do tempo

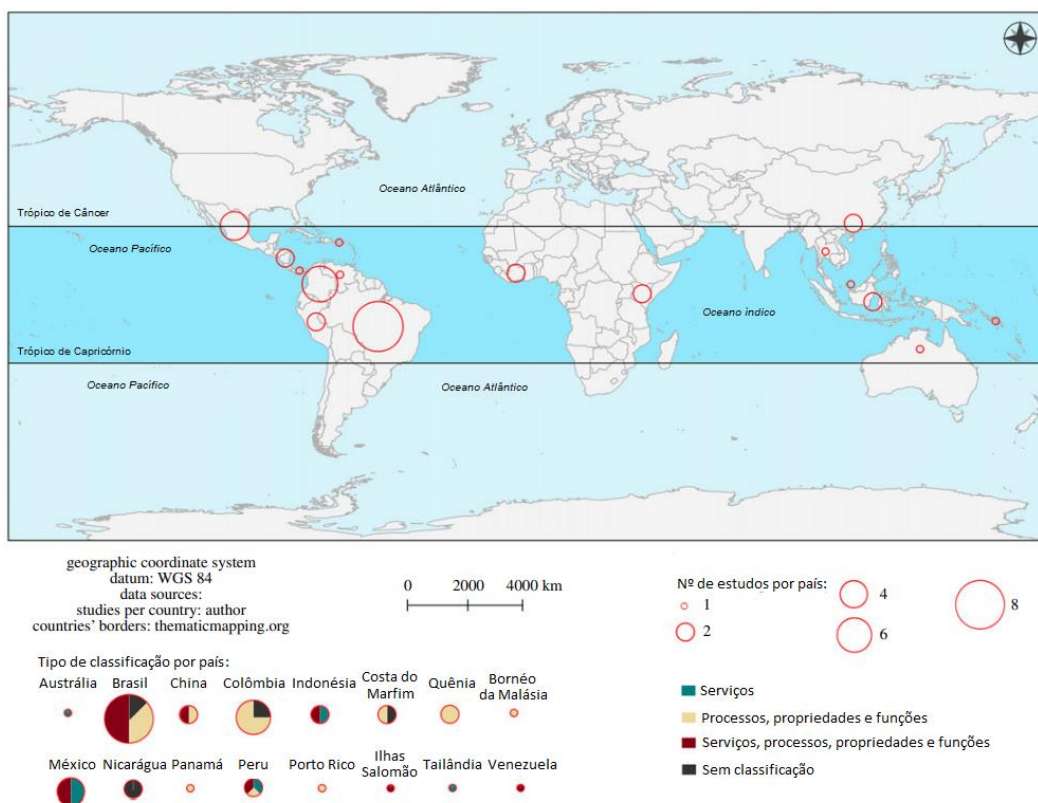


Figura 8 - Mapa resumindo os estudos de caso vinculados a países da região tropical. As cores nos gráficos de pizza descrevem como os serviços ecossistêmicos do solo foram definidos

A região tropical do continente africano apresentou dois estudos de caso (Quênia = 2) e o continente asiático quatro estudos de caso (Indonésia = 2, Tailândia = 1 e Malásia = 1). O Quênia vem ganhando destaque no continente africano no tema dos SE (WANGAI et al., 2016). O baixo número de publicações na região tropical da África e Ásia destaca a necessidade de mais investimentos em pesquisas voltadas para o tema dos SE do solo.

O tema dos SE do solo pode ajudar no desenvolvimento de instrumentos de política, como pagamentos para os SE do solo (BALVANERA et al., 2012a; OLA et al., 2019; PRADO et al., 2016). Esses mecanismos podem estimular a conservação e restauração de ecossistemas, iniciativas que são cruciais nos países da região tropical. Mais conhecimento sobre os SE do solo ajudaria esses países a superarem a severa degradação do capital natural do solo que sofrem e a melhorar seu crescimento socioeconômico (KUBISZEWSKI et al., 2016; LATAWIEC et al., 2020).

4 - Conclusões

Esta é a primeira revisão sistemática sobre os SE do solo na região tropical. Embora o número de publicações dedicadas aos SE do solo e à região tropical tenha aumentado de 2001 a 2019 (de 1 para 41), o número ainda é pequeno. Esta descoberta, por si só, destaca uma lacuna de conhecimento persistente e ressalta que mais pesquisas para capturar dados dos SE do solo para a região tropical e sua interpretação são necessárias.

A distribuição temporal dos estudos de caso indica que o número de publicações sobre SE do solo na região tropical aumentou nos últimos anos, especialmente nos últimos 6 anos. Em termos geográficos, a América do Sul tropical se destacou, e o Brasil em particular, com o maior número de estudos. Dos 41 artigos avaliados, 36 forneceram alguma classificação dos SE do solo, e a maioria (41%) classificou os SE do solo como serviços, processos, propriedades e funções do solo. Apenas oito estudos avaliaram e três valoraram os SE do solo. Esses estudos mostraram diferentes interpretações do conceito de SE e do capital natural do solo. É necessário que pesquisas futuras dedicadas aos SE do solo em um contexto tropical devem definir claramente e aplicar adequadamente o conceito dos SE do solo.

Os resultados desse estudo indicam que os diagnósticos do solo baseados apenas em medições do capital natural do solo apresentam uma face da condição do solo, e isso é uma visão incompleta. É necessário que as agências de financiamento apoiem mais projetos de SE do solo para que a classificação e os métodos se tornem mais robustos. Também é necessário desenvolver bancos de dados de solos da região tropical adequados para uso da comunidade científica que se dedica a trabalhar com os SE do solo. Recomenda-se uma transição da avaliação das propriedades do solo e função do solo para uma estrutura que atraia esses elementos para considerar os vários serviços prestados pelo solo, incluindo os valores culturais. A avaliação do SE do solo tem o potencial de contribuir

para uma visão holística do uso da terra, com uma estrutura para avaliar sinergias e compensações, e uma lente através do qual se foca em soluções e políticas para otimizar o fornecimento dos SE do solo. No entanto, são necessários esforços para desenvolver instrumentos de política, como pagamentos para os SE do solo, que irá incentivar a conservação e restauração de ecossistemas, mantendo e aprimorando os SE do solo. Portanto, incentiva-se que os cientistas, agricultores e governos em regiões tropicais a colaborar e trabalhar em prol de um objetivo comum de apreciação holística dos SE do solo.

Capítulo 3 – Manejando plântulas para a restauração do solo e provisão de serviços ecossistêmicos: uma avaliação para a Mata Atlântica Brasileira

1 - Introdução

As florestas tropicais são essenciais para a manutenção da biodiversidade, provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos (SE) e mitigação das mudanças climáticas (CHAZDON et al., 2016; STRASSBURG et al., 2014). Apesar disso, nos últimos séculos elas têm sido expostas a níveis crescentes de distúrbios de origem antrópica (LEWIS et al., 2015). Mais da metade da expansão agrícola nas últimas três décadas ocorreu em florestas tropicais, representando os principais motores do desmatamento nas regiões tropicais das Américas (IPBES, 2018). Cenários que mantêm as taxas atuais de desmatamento (*business-as-usual*) indicam que, dentro de 50 a 100 anos, as florestas tropicais estarão restritas às áreas íngremes em grandes altitudes, e apresentarão comunidades ecológicas simplificadas (EDWARDS et al., 2019). A restauração ecológica é uma das ações que visam reverter tais ameaças.

A Mata Atlântica brasileira é um domínio biogeográfico em que se predomina uma floresta tropical com histórico de desmatamento para plantações de café, cana-de-açúcar, expansão agrícola e crescimento das cidades (CALMON et al., 2011). Em conjunto com o processo histórico e recente perda de habitat, sua paisagem sofre o processo de fragmentação e atualmente apresenta uma porção substancial de arquipélagos de pequenas ilhas de vegetação dentro de uma matriz de áreas degradadas, pastagens, agricultura e áreas urbanas (JOLY et al., 2014). É um domínio considerado um dos mais ricos do mundo com alto nível de endemismo, foco de prioridades para a conservação (MYERS et al., 2000). Abriga as maiores metrópoles do Brasil, com uma população de 120 milhões de habitantes (CALMON et al., 2011; JOLY et al., 2014). Estimativas indicam que o domínio possui uma cobertura vegetal atual de 12-28% de vegetação

nativa (REZENDE et al., 2018; RIBEIRO et al., 2009). Apesar disso, as Unidades de Conservação destinadas à preservação da biodiversidade e presentes neste domínio protegem somente 9% da floresta remanescente (RIBEIRO et al., 2009). Já as áreas privadas possuem mais da metade (53%) dos remanescentes e representam grande desafio para a conservação e restauração (SOARES-FILHO et al., 2014).

Devido ao histórico de degradação do bioma, os SE providos pela Mata Atlântica brasileira estão altamente ameaçados e mal distribuídos nas paisagens. Atualmente, muitos remanescentes encontram-se concentrados em algumas regiões, longe de bacias hidrográficas com grande demanda hídrica, por exemplo (VALENTE et al., 2021). Um estudo global mostrando o impacto da mudança do uso da terra no carbono orgânico do solo (COS) demonstrou perdas significativas após o desmatamento na região da Mata Atlântica (SANDERMAN et al., 2018). Diante desse cenário, garantir o bem-estar e a demanda por recursos naturais para a crescente população que habita a região da Mata Atlântica, simboliza um enorme desafio. Somente iniciativas de conservação e restauração ecológica dos ecossistemas podem reverter essa situação.

A restauração ecológica é definida como o processo da assistência à recuperação de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído. A prática da restauração ecológica busca alcançar a recuperação do ecossistema visando um modelo nativo local, comumente chamado de ecossistema de referência (ENGEL, VERA L.; PARROTTA, 2003; SER, 2016). Diversos acordos em âmbito global e nacional tem estimulado a restauração ecológica da Mata Atlântica. Em nível internacional, destaca-se o *Bonn Challenge* e o *The New York Declaration on Forests*, em que as partes interessadas se comprometeram em restaurar 350 milhões de hectares de terras degradadas e desmatadas até 2030. Em nível nacional, destaca-se o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa – PLANAVEG – por meio do qual o governo brasileiro pretende restaurar pelo menos 12 milhões de hectares até 2030 (MMA/ICMBIO, 2017); e também o Pacto pela Restauração da Mata Atlântica, que visa restaurar 15 milhões de hectares até 2050 (PREISKORN

et al., 2009). A restauração da Mata Atlântica traz a esperança de recuperação, manutenção e provisão dos SE para as próximas gerações.

A restauração ecológica como ciência e prática, mudou gradualmente ao longo do tempo, de uma antiga dependência de pontos de referência e composições fixas para um foco em “configurações orientadas para o processo”, com múltiplas trajetórias potenciais (CHOI, 2007; HIGGS et al., 2014). Também avançou no conhecimento dos efeitos da restauração sobre a biodiversidade e no sequestro de carbono acima do solo (CROUZEILLES et al., 2017; MORRISON et al., 2011). No entanto, o conhecimento sobre os efeitos da regeneração natural e restauração no estoque de carbono no solo (NEUMANN-COSEL et al., 2011), em diversos outros atributos e na provisão de SE do solo, permanecem ainda pouco explorados (MENDES et al., 2018).

Explorar a trajetória da recuperação do solo de áreas degradadas, derivada do plantio de árvores nativas, pode contribuir para a promoção de estratégias mais eficazes de recuperação dos ecossistemas. O plantio de árvores nativas em áreas degradadas tem demonstrado aumentar a incorporação de nutrientes e matéria orgânica no solo (RUIZ-JAÉN; AIDE, 2005). Além disso, a mudança na umidade e temperatura do solo com o plantio, também tem demonstrado facilitar a germinação e crescimento de plântulas (PARROTTA et al., 1997). Dessa forma, entender a trajetória de recuperação do solo pode contribuir para esclarecer qual o potencial do solo em recuperar e prover SE ao longo do tempo.

Aplicar o conhecimento de práticas sustentáveis no contexto da restauração, tais como o uso de biocarvão, compostagem, vermicompostagem nos plantios de mudas, tanto na fase dos viveiros quanto em campo, podem promover um melhor desenvolvimento das plantas. O biocarvão, produto derivado da pirólise de resíduos, tem sido reconhecido como um potencial condicionador de solos para ajudar no crescimento das plantas (FORNES et al., 2019). Ainda, devido a sua estabilidade e resiliência no solo, tem potencial para o aumento no estoque de carbono nesse compartimento terrestre (LEHMANN et al., 2009; NOVOTNY et al., 2015). A partir de uma meta-análise global, verificou-se

que o crescimento de árvores com adição de biocarvão resultou no aumento médio de 41% na biomassa (THOMAS et al., 2015). Neste sentido, o biocarvão tem o potencial de promover o desenvolvimento de espécies provedoras de diversos SE relacionados à produção de alimentos, madeiras, celulose, entre outros. Além disso, o uso do biocarvão pode melhorar no desenvolvimento de mudas e consequentemente a renda de produtores, seja com a venda dos produtos obtidos ou com o desenvolvimento e consolidação de um mercado de carbono futuro no país. Contudo, o efeito do biocarvão na sobrevivência e crescimento de mudas para restauração ainda é incerto, podendo variar entre espécies (RODRIGUES, 2017).

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes técnicas no plantio de mudas para a recuperação ambiental e sua consequente influência na qualidade do solo e provisão do SE de estoque de carbono. Além disso, valorar o SE do estoque de carbono do solo. As hipóteses são que I) o biocarvão contribui para maior sobrevivência de algumas espécies da Mata Atlântica brasileira e II) o manejo com o plantio de mudas resulta em um maior acúmulo de carbono no solo e melhora a qualidade do solo ao longo do tempo (Figura 9).

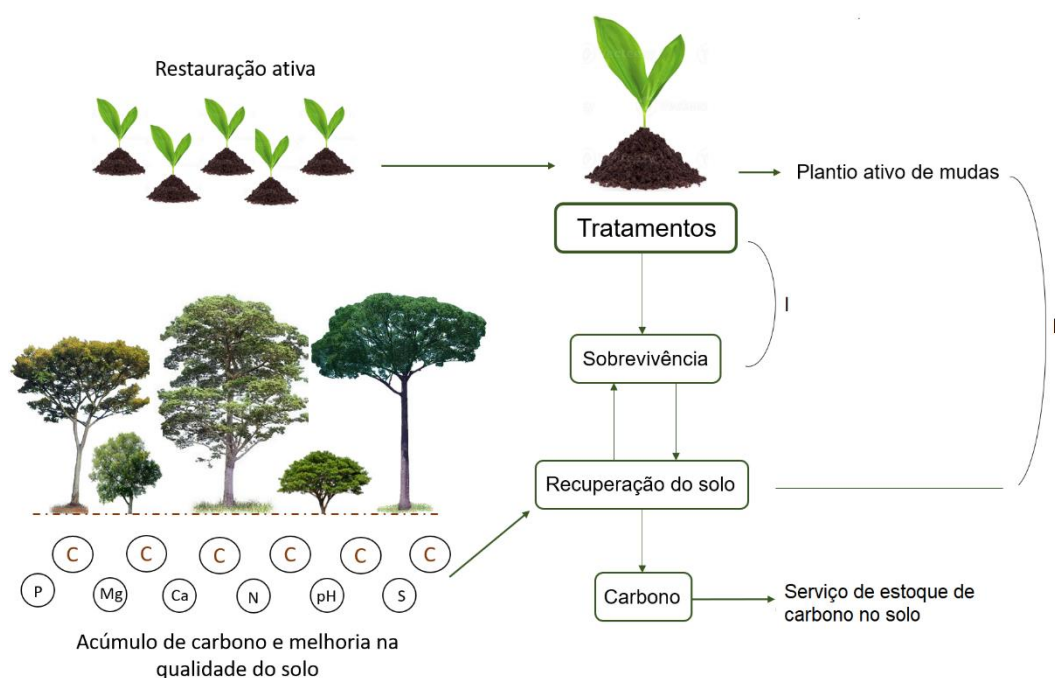


Figura 9 – Diagrama do efeito da restauração ativa por meio do plantio de mudas na sobrevivência de plantas e recuperação do solo. I) Os tratamentos com biocarvão contribuem para a maior sobrevivência de algumas espécies da Mata Atlântica; II) o plantio ativo favorece o acúmulo de carbono e melhoria na qualidade do solo ao longo do tempo. A sobrevivência das mudas contribui para a recuperação do solo que por sua vez contribui para a sobrevivência maior das mudas. Esse processo contribui para o acúmulo maior de carbono e melhoria na qualidade do solo. Ênfase ao carbono no solo, que está relacionado ao serviço ecossistêmico de estoque de carbono que será valorado no estudo

2 - Materiais e métodos

2.1 - Caracterização da área de estudo

O experimento foi realizado dentro da Reserva Biológica de Poço das Antas (REBIO), localizada no município de Silva Jardim, na parte central costeira do estado do Rio de Janeiro (22°32'25,63"S 42°18'19,64"W) (Figura 10). Essa área foi degradada na década de 70 do século passado para aterrar uma represa local, a represa de Jurtunaíba. Desde então, a área não regenerou e tem sido dominada pela presença da espécie *Miconia albicans* (Sw.) DC., mesmo sendo circundada por floresta secundária protegida. Os solos da área do plantio

são classificados como Cambissolo Háplico (Embrapa, 2018). O clima da região é classificado tropical com inverno seco (Aw), com período de chuvas predominantemente de dezembro a março e o período de seca de julho a agosto (ALVARES et al., 2014). No verão, a média da temperatura máxima é maior em fevereiro com o valor de 30°C e com a mínima na média de 24°C. Já no inverno, a média da temperatura máxima é menor em julho, com o valor de 24°C e a média da mínima com o valor de 18°C. A precipitação é maior nos meses de janeiro (média de 255 mm) e dezembro (média de 277 mm; Climatempo, 2022).

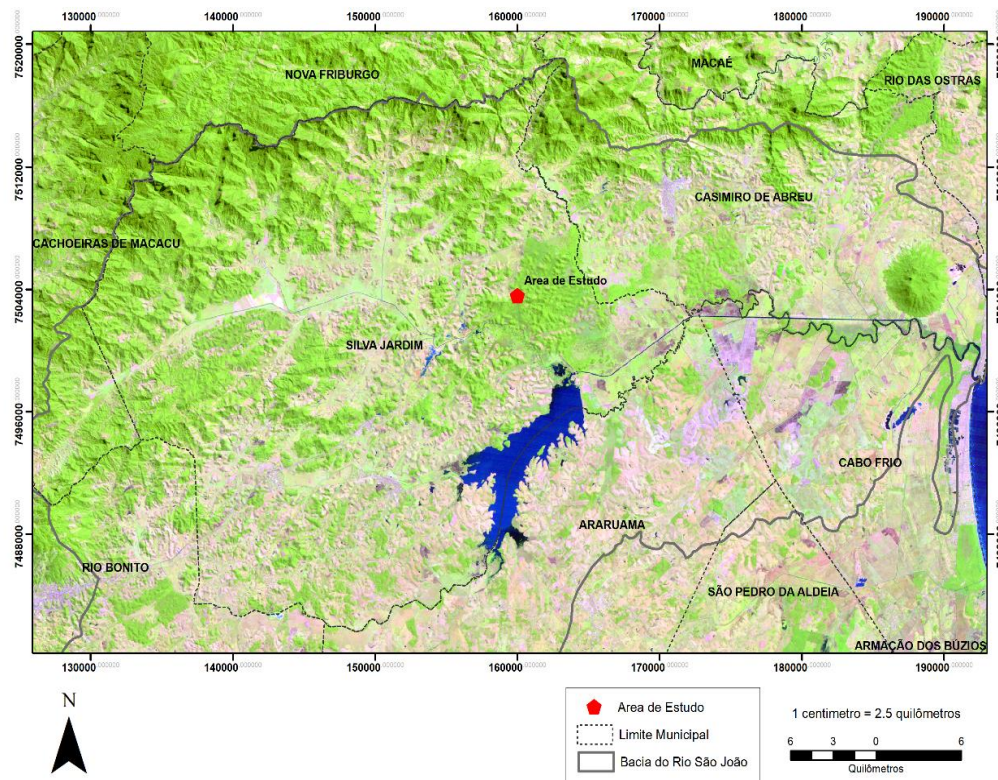


Figura 10 - Mapa de localização da área em que o experimento foi desenvolvido

2.2 - Desenho experimental

O experimento foi iniciado no dia 10 de outubro de 2016. Foram estabelecidos cinco blocos na área do plantio, cada um contendo 49 mudas, com espaçamento de 1,5 m x 3,0 m. As mudas plantadas nesse experimento são provenientes de um estudo desenvolvido com viveiros na região (RODRIGUES, 2017). As espécies plantadas foram: I) *Schinus terebinthifolius* Raddi; II) *Senna multijuga* (Rich.) H.S. Irwin & Barneby; III) *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze; IV) *Trema micranta* (L.) Blume; todas nativas da Mata Atlântica brasileira. As mudas dessas espécies foram sujeitas a oito diferentes tratamentos:

- 1 – controle – nenhum tipo de tratamento durante o crescimento e plantio das mudas
- 2 – hidrogel – acréscimo de 1L em cada cova no momento do plantio
- 3 – 20% de biocarvão – o substrato utilizado nas mudas durante o período no viveiro foi acomodado em sacos plásticos de 1,7 L com 20% do volume ocupados por biocarvão
- 4 – 20 % de biocarvão e hidrogel
- 5 – 40% de biocarvão – o substrato utilizado nas mudas durante o período do viveiro foi acomodado em sacos plásticos de 1,7 L com 40% do volume ocupados por biocarvão
- 6 – 40% de biocarvão e hidrogel
- 7 – calcário – substâncias acrescentadas nas mudas no período do viveiro segundo a tabela 4.

As espécies foram produzidas em dois viveiros diferentes seguindo a recomendação dos tratamentos e compostos específicos desenvolvidos pelos viveiros (Tabela 4). O biocarvão utilizado foi derivado de *Gliricidia sepium* (jacq.) Kunth ex Walp., e pirolisado por cerca de 10 horas, em temperatura por volta de 400° C, em um forno de um latão (Anexo 1). A

adição de hidrogel foi recomendada pelos funcionários da REBIO no planejamento do plantio na dosagem de 1L por cova. Devido à disponibilidade de mudas, não foi possível plantar para cada espécie e cada tratamento, a mesma quantidade de réplicas (Tabela 5).

Tabela 4 – Informações sobre os compostos formados pelos viveiros para a produção de mudas

Tropical Amizade (espécies: <i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi e <i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S. Irwin & Barneby)		
	Componentes	Quantidade
	Argila	400 L
	Estrume bovino	100 L
	NPK (4/14/8)	2,5 Kg
	Fosfato de Araxá (P2O5)	30 g
	Calcário	1 Kg
Tropical Acácia e Vitoria Régia (espécies: <i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze e <i>Trema micranta</i> (L.) Blume)		
	Componentes	Quantidade
	Material orgânico	100 L
	Argila	200 L
	Estrume bovino	100 L
	NPK (4/14/8)	10 g
	Fosfato de Araxá (P2O5)	30 g
	Calcário	200 g

Tabela 5 – Número de mudas plantadas para cada espécie em cada tratamento

Tratamentos	<i>Schinus terebinthifolius</i>	<i>Senna multijuga</i>	<i>Cariniana legalis</i>	<i>Trema micranta</i>
Controle	8	9	5	10
Hidrogel	8	9	5	10
20% de biocarvão	6	12	2	11
20% de biocarvão + hidrogel	8	9	5	13
40% de biocarvão	7	7	3	11
40% de biocarvão + hidrogel	9	10	3	8
Calcário	6	8	4	10
Calcário + Hidrogel	7	7	5	10

2.3 - Coleta e análise de informações das mudas

Avaliou-se a sobrevivência das mudas em 15 visitas, que ocorreram entre os 10/11/2016 a 11/01/2021 (Apêndice 2). Em cada visita registrava-se se os indivíduos estavam ou não vivos (Apêndice 3). A partir dessas informações, foi realizada a análise de sobrevivência para as quatro espécies, separadamente, usando o pacote *Survival* (MELLO et al., 2016; THERNEAU, 2020), dentro do programa R (R CORE TEAM, 2020). O tempo foi modelado até a morte do indivíduo ou última visita feita usando uma distribuição *Weibull* e os efeitos das variáveis biocarvão, calcário e hidrogel foram considerados como efeitos fixos. Em seguida, foi utilizada uma abordagem de seleção de modelos para encontrar a combinação de variáveis aditivas que melhor se ajusta aos dados, considerando um critério de informação (BURNHAM et al., 1998). Os coeficientes do modelo foram calculados usando a estimativa de máxima verossimilhança e usando o critério de informação de Akaike (AIC) para a inferência estatística. Os modelos com $\Delta AIC < 2$ foram considerados igualmente plausíveis.

2.4 - Amostragem e análise de solo

Amostras de solo da camada superficial (0-20 cm) da área do plantio foram coletadas no início do experimento – outubro de 2016 (T0) – e em mais dois momentos distintos – julho de 2020 (T1) e janeiro de 2021 (T2). Amostras da área da floresta adjacente da camada superficial (0-20 cm) também foram coletadas em maio de 2021. As amostras de solo foram homogeneizadas e peneiradas em 2 mm, e analisadas para pH (em água), Potássio (K – mg/dm³), Fósforo (P - mg/dm³), Cálcio (Ca – Cmolc/dm³), Magnésio (Mg – Cmolc/dm³), Matéria orgânica (MO - dag/kg), Nitrogênio (N – g/kg), Enxofre (S – mg/dm³), areia (dag/kg), silte (dag/kg) e argila (dag/kg). As análises de K e P foram extraídas por Mehlich⁻¹. Ca e Mg foram extraídas com uma solução de 1.0 mol L⁻¹ de KCl e determinado por espectroscopia de absorção atômica. O N total foi determinado usando o método de Kjeldahl (KJELDAHL, 1883). A MO foi extraída através de uma

solução de NaCr_2O_7 e H_2SO_4 (RAIJ et al., 2001). O conteúdo de Carbono (C – g/kg) foi estimado usando o fator de van Bemmelen ($=1.724$) (COLLINS et al., 2001).

A fim de se avaliar a hipótese de que o plantio ativo de mudas contribui para a restauração e melhoria da qualidade do solo, para cada variável amostrada, comparou-se os valores obtidos na área degradada nos três diferentes tempos com a área florestal. Utilizou-se modelos lineares generalizados para inferências estatísticas (STRANBERRY, 2013). As distribuições utilizadas para cada variável foram selecionadas entre gaussiana, gamma, poisson, quasipoisson e bionomial negativa, a depender de análises de distribuição dos resíduos e qualidade do ajuste do modelo (BURNHAM et al., 1998). Em seguida, realizou-se o teste "Tukey" para comparar os tempos e a área florestal entre si (HAYNES, 2013).

2.5 - Valoração do serviço de estoque de carbono no solo

Para a valoração do serviço de estoque de carbono no solo, foram utilizados os valores de COS (g/kg). Primeiramente, para calcular quantas gramas de COS em um cm^3 de solo amostrado utilizou-se uma função de predição desenvolvida por Benites e colaboradores (BENITES et al., 2006; anexo 2 e apêndice 4) para estimar a densidade média (D) do solo da área em que ocorreu o experimento para o período de coleta T1 e T2. Não foi possível calcular a densidade média para o T0, devido à ausência de informações sobre o conteúdo de argila. Esse fator não prejudica a análise visto que a granulometria do solo dificilmente muda com o uso. Dessa forma, a D de $1,37 \text{ g/cm}^3$ foi assumida para o solo da área do experimento. Para o cálculo do volume total de solo degradado na região, considerou-se os 20 cm de profundidade de coleta e área total degradada de 1440 m^2 . Assim, o estoque de COS (E) foi obtido através da equação:

$$E_i = A_i(\text{g}/1000\text{g}) \times D(\text{g}/\text{cm}^3) \times V(\text{cm}^3)$$

onde A é o valor de COS amostrado no tempo i, D a densidade média do solo e V o volume total de solo considerado.

Estudos indicam que somente cerca de 79%-90% do COS do solo é estável (SIX et al., 2002; TIAN et al., 2016), o que significa que os valores utilizados nos cálculos deste estudo podem não representar o real C estocado no solo a longo prazo. No entanto, técnicas mais assertivas como a ressonância magnética nuclear para a caracterização do C estável no solo, ainda se mostram de difícil acesso quando comparadas com análises de COS feitas de rotina em laboratórios.

A diferença do COS no início do experimento (T0) e da última amostragem (T2) foi aferida e então convertido em toneladas de CO₂ equivalente (CO_{2eq}), utilizando o fator 3,67 (PANIAGUA-RAMIREZ et al., 2021; apêndice 5). Com isso pode-se considerar a adicionalidade de se utilizar plantio direto como ferramenta para se atingir o benefício do estoque de carbono. O resultado do CO_{2eq} foi então multiplicado pelo preço médio do carbono no mercado voluntário para *Nature Based Carbon Offset* de acordo com a plataforma *Carbon Credits* - \$14,10 t/CO_{2eq}. Além disso, o valor de CO_{2eq} do experimento também foi multiplicado por \$60t/CO_{2eq} e \$75t/CO_{2eq} (médias referentes para 2020 e 2030, respectivamente), que são valores considerados consistentes para se alcançar a meta de temperatura do acordo de Paris (WORLD BANK, 2019).

3 - Resultados

3.1 - Sobrevivência

As quatro espécies plantadas no experimento apresentaram diferença no padrão de sobrevivência em resposta às variáveis ao longo dos 39 meses (Figura 11). Houve uma perda de 86,5% das mudas ao longo do tempo (apêndice 3). A *Cariniana legalis*, apresentou maior sobrevivência no tratamento com 20% de biocarvão e hidrogel e nos tratamentos de 20%

e 40% de biocarvão, principalmente após o 20º mês. Enquanto as mudas que foram submetidas ao tratamento com hidrogel apresentaram a menor sobrevivência. Para as mudas de *Senna multijuga* o tratamento com o hidrogel apresentou a maior sobrevivência desde o 10º mês. Por outro lado, o tratamento com 20% de biocarvão + hidrogel foi o que apresentou menor sobrevivência das mudas. Para as mudas das espécies *Schinus terebinthifolius* e *Trema micrantha* não houve diferença entre os tratamentos, os modelos avaliados não apresentaram melhor ajuste que o modelo nulo (Tabela 6). A tabela 6 contém os modelos, com seus respectivos parâmetros, que apresentaram ajustes com $\Delta AIC < 2$.

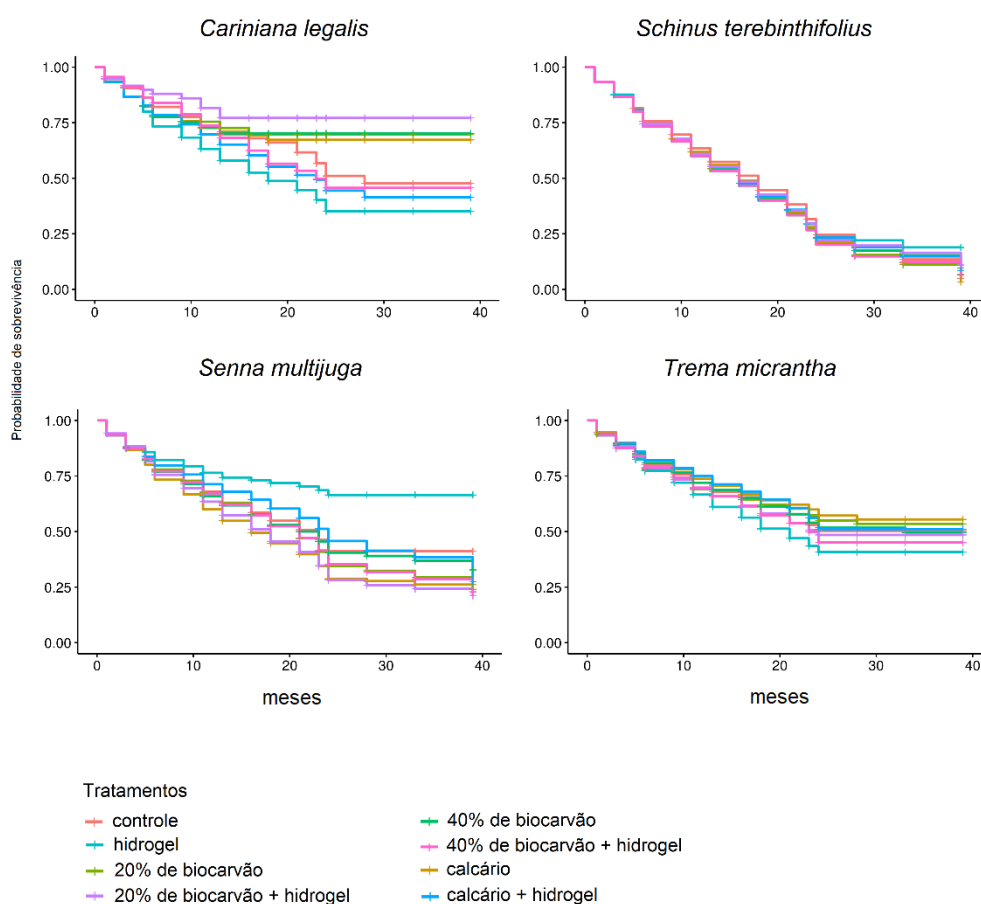


Figura 11 - Função de sobrevivência de mudas de *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze, *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Senna multijuga* (Rich.) H.S. Irwin & Barneby, e *Trema micrantha* (L.) predita pelos modelos de sobrevivência selecionados. Modelo de sobrevivência com distribuição Weibull. Os fatores incluídos nos modelos estão relacionados à presença ou ausência de biocarvão, hidrogel ou calcário como também as suas quantidades (20% ou 40%)

Tabela 6 – Modelos selecionados para os efeitos dos tratamentos na sobrevivência das espécies do experimento. Os modelos foram calculados usando a estimativa de Máxima Verossimilhança e usando o Critério de Informação de Akaike. O tempo foi modelado até a morte do indivíduo ou última visita feita usando uma distribuição Weibull e as variáveis biocarvão, calcário e hidrogel foram considerados como efeitos fixos. AIC = Critério de Informação de Akaike; ΔAIC = AIC para cada modelo — AIC para o modelo de melhor ajuste. Df são os graus de liberdade. peso de Akaike é o peso da evidência de cada modelo

Espécie	Modelo	ΔAIC	df	peso de Akaike
<i>Cariniana legalis</i>	Hidrogel + Biocarvão	0	4	0,33
<i>Cariniana legalis</i>	Hidrogel	1,35	3	0,17
<i>Cariniana legalis</i>	Hidrogel + Biocarvão + Calcário	1,63	5	0,15
<i>Cariniana legalis</i>	Biocarvão	1,98	3	0,12
<i>Schinus terebinthifolius</i>	Null	0	2	0,34
<i>Schinus terebinthifolius</i>	Biocarvão	1,61	3	0,15
<i>Schinus terebinthifolius</i>	Hidrogel	1,74	3	0,14
<i>Schinus terebinthifolius</i>	Calcário	1,92	3	0,13
<i>Senna multijuga</i>	Hidrogel + Biocarvão + Calcário	0	5	0,38
<i>Senna multijuga</i>	Calcário + Biocarvão	0,06	4	0,37
<i>Trema micrantha</i>	Calcário + Hidrogel	0	4	0,22
<i>Trema micrantha</i>	Calcário	0,5	3	0,17
<i>Trema micrantha</i>	Hidrogel	0,62	3	0,16
<i>Trema micrantha</i>	Null	0,88	2	0,14
<i>Trema micrantha</i>	Hidrogel + Biocarvão + Calcário	1,72	5	0,09

3.2 - Propriedades químicas e físicas do solo

De acordo com os resultados do pH do solo, a área do plantio no início do experimento e a floresta apresentaram os solos com maior acidez quando comparados com os solos coletados nos T1 (45° mês) e T2 (51° mês) (Figura 13 e Tabela 7). O conteúdo de K foi maior no T2 na área do plantio e o maior conteúdo geral foi observado no solo florestal. Já o conteúdo de Ca foi maior na área do plantio no T2 e foi semelhante ao do solo florestal. Os conteúdos de P e S não variaram ao longo do experimento. Os teores de Mg e N nos solos da área do plantio cresceram ao longo do tempo e seus maiores valores foram verificados nos solos florestais. O mesmo padrão foi observado para os teores de COS. De acordo com os dados de granulometria, os solos da área do plantio e da floresta apresentaram conteúdos semelhantes de areia. Os conteúdos de argila foram maiores na área do plantio quando comparados ao da floresta,

Figure 1 displays 11 box plots showing the distribution of various chemical and physical attributes for four soil samples: Floresta, T0, T1, and T2. The y-axis represents the 'Valor' (Value). The legend indicates the color coding for each sample: Floresta (green), T0 (blue), T1 (yellow), and T2 (orange). Letters above the boxes indicate statistical significance groups.

Attribute	Floresta	T0	T1	T2
pH (H ₂ O)	~4.2 (b)	~4.1 (b)	~4.4 (a)	~4.5 (a)
K (mg/dm ³)	~105 (a)	~25 (c)	~20 (d)	~70 (b)
Ca (Cmolc/dm ³)	~0.25 (a)	~0.05 (b)	~0.05 (b)	~0.25 (a)
P (mg/dm ³)	~0.8 (a)	~0.1 (a)	~0.1 (a)	~0.3 (a)
S (mg/dm ³)	~18 (a)	~25 (a)	~25 (a)	~20 (a)
Mg (Cmol/dm ³)	~0.3 (a)	~0.05 (c)	~0.05 (c)	~0.18 (b)
N (g/kg)	~3.0 (a)	~0.8 (c)	~1.2 (b)	~1.2 (b)
COS (g/kg)	~15 (a)	~2 (c)	~2 (c)	~5 (b)
Argila (dag/kg)	~28 (b)	~35 (a)	~35 (a)	~35 (a)
Areia (dag/kg)	~60 (a)	~55 (a)	~55 (a)	~55 (a)
Silte (dag/kg)	~15 (a)	~10 (b)	~10 (b)	~15 (a)

3.3 - Valoração do serviço de estoque de carbono no solo

A quantidade de C estocado no solo no início do experimento (T0) foi de 0,83 t (desvio padrão: 0,28 t). Já no final, o conteúdo foi de 2,09 t (desvio padrão: 1,09 t). A diferença entre o T2 e o T0 indica que o solo

estocou em média 1,25 t em toda a área do experimento, o que equivale a 4,61 t de CO_{2eq} (Apêndice 5).

O valor total do SE de estoque de carbono do cambissolo háplico previamente degradado do local do experimento, foi estimado em US\$ 65 (Tabela 7), considerando o valor de \$ 14,10 do mercado voluntário. O valor dividido por quatro anos, que representa o tempo do experimento, seria de US\$ 16,25 ha/ano. Para a restauração ativa de 1 ha em local com condições semelhantes, o valor total seria de US\$ 450,35, e por quatros anos de US\$ 112,59 ha/ano.

Considerando a média do valor do preço de carbono recomendado pelo *Report of High-Level Commission on Carbon Prices* para o ano de 2020 (US\$ 60), o valor do serviço no local do experimento apresenta a estimativa de US\$ 69,15 ha/ano. Para o cenário do ano de 2050 (US\$ 75), o valor do serviço seria de US\$ 86,44 ha/ano. Para a restauração ativa em 1 ha, em solos com condições semelhantes, o valor seria de US\$ 479,10 ha/ano para o cenário de 2020 e de US\$ 598,88 ha/ano para o ano de 2050.

Tabela 7 – Valor monetário do serviço ecossistêmico de estoque de carbono em área de restauração na Mata Atlântica Brasileira e sua equivalência para 1 hectare, com diferentes cenários de valor do CO_{2eq}

Cenários	Experimento - 1440 m2	1 hectare
US\$ CO _{2eq} - Mercado voluntário a US\$ 14,10	65,00	450,35
US\$ CO _{2eq} - Mercado voluntário a US\$ 14,10 por ano	16,25	112,59
US\$ CO _{2eq} - Acordo de Paris a US\$ 60	276,60	1916,40
US\$ CO _{2eq} - Acordo de Paris a US\$ 60 por ano	69,15	479,10
US\$ CO _{2eq} - Acordo de Paris a US\$ 75	345,75	2395,50
US\$ CO _{2eq} - Acordo de Paris a US\$ 75 por ano	86,44	598,88

4 – Discussão

A restauração ativa promovida na área degradada do estudo indica que ações de manejo podem melhorar as condições de fertilidade do solo em um curto período de quatros anos. Além disso, este estudo mostra que

as espécies têm diferentes respostas de sobrevivência ao longo do tempo. Por exemplo, o uso do biocarvão parece importante somente para o aumento da sobrevivência das mudas de *Cariniana legalis*. Este estudo destaca a importância da recuperação da qualidade do solo por meio da restauração ecológica e constata através de observações o aumento significativo de estoque de carbono no solo. Com frequência, debates e ações de restauração, assim como discussões no mercado, focam mais a atenção no estoque de carbono de árvores do que do solo. Como efeito desse contexto, observa-se na literatura científica um baixo volume de investigações dos parâmetros do solo e provisão de SE do solo de áreas em regeneração natural e restauração ecológica (EHRENFELD et al., 2005; MENDES et al., 2019).

4.1 – Sobrevivência

Há trabalhos que demonstram que a disponibilidade de nutrientes no solo desempenha um papel importante na sobrevivência e desenvolvimento de árvores de florestas tropicais (SIREGAR, 2007; SOBANSKI et al., 2014) e que um solo pobre em nutrientes representa uma das principais barreiras à regeneração natural (HOLL, 1999). Portanto, locais com solos empobrecidos muitas vezes necessitam de técnicas de restauração ecológicas ativas, como o plantio direto de espécies nativas. Ainda, evidências sugerem que o povoamento de espécies é mais influente na recuperação do estoque de carbono do solo de florestas durante 10-30 anos, do que fatores como geologia do substrato e uso prévio da terra (JONES et al., 2019)

A sobrevivência das mudas em áreas degradadas é uma etapa importante no processo de recuperação do ecossistema, contribuindo na proteção do solo e fornecimento de MO (DE ALMEIDA, 2016). Além disso, tal processo pode sequestrar significativas quantidades de carbono atmosférico, via fotossíntese, fator importante na questão das mudanças climáticas (IPCC, 2000; LAL, 2004). De maneira geral, o estudo apresentou

perda de 86,5% das mudas ao longo do tempo (Apêndice 3) e cada espécie sobreviveu de maneira diferenciada aos tratamentos. Diferentes respostas, de acordo com a espécie, ao efeito do biocarvão já foram relatadas em outros estudos (JUNO et al., 2021; THOMAS et al., 2015). Em plantios com condições semelhantes a esse experimento, o biocarvão na dosagem de 20% + hidrogel e nas dosagens de 20% e 40 % pode ser recomendado no plantio da *Cariniana legalis*, e o hidrogel para o plantio *Senna multijuga*, pois contribuíram para maior sobrevivência dessas mudas.

A espécie *Cariniana legalis* se adapta melhor a solos férteis, ricos em MO e bem drenados, em temperaturas variando de 25° a 35° C e com precipitações médias acima de 1500mm anuais (RÊGO et al., 2004). A sua maior sobrevivência nos tratamentos com biocarvão pode estar associada a presença de alguns macronutrientes e a alcalinidade do substrato. O biocarvão utilizado no experimento aumentou de acordo com as doses (20% e 40%) os valores de pH, K e Na dos substratos na fase dos viveiros (RODRIGUES, 2017). Essas características podem ter aliviado os efeitos nocivos dos solos da área do plantio, isto é, solos ácidos e pobres em nutrientes. Além disso, a presença do hidrogel no tratamento com 20% de biocarvão demonstra, em certa medida, a importância da água para essa espécie. Para as outras espécies do presente estudo, o pH alcalino e esses macronutrientes parecem não ter tido a mesma relevância. Efeitos não significativos do biocarvão na sobrevivência de mudas também foram vistos em um estudo com a *Spondias tuberosa* Arruda, espécie da Caatinga (MERTEN et al., 2016), e com a *Quercus rubra* comum de áreas temperadas (JUNO et al., 2021).

Em um estudo com 51 espécies tropicais, o biocarvão melhorou a sobrevivência de plântulas, e os autores concluíram que o biocarvão funciona bem quanto mais baixa for a densidade da madeira (ROMÁN-DAÑOBEYTIA et al., 2021). Contrariamente, foi demonstrado neste trabalho que a espécie *Cariniana legalis* foi a que apresentou maior sobrevivência, sendo a que apresenta a maior densidade - 0,53 g/cm³ (GARCIA et al., 2009) dentre as espécies estudadas, e a *Trema micranta* a menor - 0,364 g/cm³ (COSTA et al., 2014). Possivelmente, o biocarvão

melhora a sobrevivência daquelas plântulas que demandam nutrientes presentes neles, e que não estão disponíveis no solo.

A espécie *Senna multijuga* pode crescer em solos úmidos, em terrenos encharcados, e é comum em solos arenosos (CARVALHO, 2003). Nesse estudo, a sobrevivência das mudas dessa espécie foi maior no tratamento com hidrogel, corroborando os relatos na literatura de afinidade da espécie a solos com umidade. Também conhecido como polímeros hidrorretentores, o hidrogel funciona como uma reserva de água para as plantas, importantes em situações de estresse hídrico, e podem ajudar na agregação do solo (FONSECA et al., 2017; SANNINO et al., 2009; THAKUR et al., 2015; WOMACK et al., 2022). O biocarvão e o calcário presente nos demais tratamentos, reduziram a sobrevivência desta espécie, indicando que nas condições do estudo, o pH do solo e ausência dos nutrientes não eram os fatores mais importantes para a sobrevivência dessa espécie. Em experimentos com plantio de mudas de *Eucalyptus pilularis* Smith e *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* (F. Muell.) A.R. Bean & M.W., espécies do leste da Austrália, o hidrogel teve efeito positivo na sobrevivência das plantas (THOMAS, 2008). Enquanto para a sobrevivência e crescimento da *Anadenanthera peregrina* (L.) SPEG, espécie do Cerrado, o efeito foi prejudicial (SOUSA et al., 2013).

4.2 – Recuperação do solo

No estudo, o manejo na área com o plantio de mudas apresentou efeitos positivos para algumas propriedades do solo avaliadas no experimento. Essa melhoria pode estar associada a MO das mudas plantadas que vai para o solo e também da MO de novas espécies que se estabeleceram no experimento com o manejo da área (TAMM, 2022). A MO apresenta papel importante no aporte de nutrientes no solo, contribuindo para a fertilidade química (LAL, 2004; MURPHY, 2015; NOVAK et al., 2019; WANG et al., 2018). A MO contribui para diminuir o pH do solo, pois a sua decomposição leva à produção de ácidos orgânicos (HONG et al., 2019).

Em geral, os solos florestais são ácidos com fertilidade limitada (KUNITO et al., 2016; RANGER, 2018). Os resultados deste estudo demonstram diferente constatação, com os solos do plantio no início do experimento com pouca MO e baixo pH, semelhante ao da floresta. Esse fato pode estar associado à combinação do solo arenoso e lixiviação de íons de Mg e K, que diminuem o pH do solo. Condição similar já foi verificada em outro estudo na região tropical (ZHAO et al., 2018). O aumento de nutrientes como K, Ca e Mg com o plantio de mudas foi verificado, e isso pode ser explicado pela fonte desses nutrientes nas folhas das espécies plantadas e recrutadas com o manejo. Em estudos na literatura, florestas e áreas de plantio de *Tectona grandis* L.f., apresentaram maiores valores de Ca quando comparado com outras florestas sem a espécie. Esse fato estava associado à alta concentração de Ca nas folhas de *Tectona grandis* L.f., que são devolvidas ao solo quando ocorre a queda das folhas (BOLEY et al., 2009).

Foi constatado um aumento significativo no estoque COS em resposta à restauração ecológica em quase quatro anos do experimento, contudo este ainda é menor que na área de vegetação florestal adjacente. Tal aumento está associado ao aumento no aporte de MO, pois a MO é feita de compostos altamente ricos em C (ONTL, 2018; ZHANG et al., 2019). De forma indireta, o C no solo também é derivado da transferência de compostos enriquecidos com C das raízes, para os micróbios do solo (ONTL, 2018). O COS está disponível em sua forma lábil, utilizados no solo com relativa facilidade, e em sua forma recalcitrante, que é resistente à degradação e principal responsável pelo estoque de C a longo prazo (DE GRAAFF et al., 2010; KLEBER, 2010). Outros estudos com o aumento de COS em áreas de restauração na Mata Atlântica, tem sido reportado (NOGUEIRA et al., 2016; NOGUEIRA et al., 2011). Entretanto, resultados que demonstram nenhuma diferença significativa e diminuição no COS em sucessão de florestas tropicais, também têm sido relatados (POWERS et al., 2017). O C do solo apresenta importante papel na estrutura do solo, fatores edáficos, produtividade e balanço global de C (NOGUEIRA et al., 2011). Além disso, representa uma das formas mais eficientes de mitigação

das mudanças climáticas por poder estocar duas vezes mais C que a atmosfera e três vezes mais C do que a vegetação (BLUM, 2005). Atribuir valor a uma unidade de C (ou de forma mais ampla, uma unidade de CO_{2eq}), tem simbolizado um caminho para frear as emissões de gases do efeito estufa (GEE), pelo mecanismo de cobrança de taxas aos emissores ou através do mercado voluntário (KEENOR et al., 2021).

4.3 – Valoração do serviço de estoque de carbono no solo

Dados os benefícios relacionados ao aumento do conteúdo de COS ao longo de 4 anos no local do estudo, os proprietários de terra que desejam fazer a restauração podem se beneficiar com o pagamento por SE relacionado ao estoque de carbono no solo. No mercado voluntário, com o CO_{2eq} com o valor de US\$14,10, uma propriedade que implemente a restauração de 1ha com condições semelhantes ao do estudo poderia receber pelo serviço um total de US\$ 450,35. E considerando as recomendações de preço do carbono do *Report of High-Level Commission on Carbon Prices* (WORLD BANK, 2019), o proprietário poderia receber pelo serviço o valor de US\$ 1.916,40 no cenário proposto para 2020, e US\$ 2.395,50 no cenário para 2050.

O C armazenado no solo deve ser reconhecido como parte das soluções florestais no programa “Redução de Emissões provenientes de Desmatamento e Degradação Florestal” (REDD +) (UN-REDD, 2016). Pagamentos pelo C do solo deveriam ser implementados, simbolizando mais uma via de incentivo aos proprietários rurais pelas ações de mitigação (KEENOR et al., 2021). Além disso, plataformas de verificação e vendas de créditos de C, tais como a Verra e Puro.Eart poderiam incorporar o estoque de C do solo em seus portfólios, de forma a ser comercializado no mercado de compensação voluntária. O Reino Unido, com o mercado regulado, desenvolveu novos regulamentos e sistemas de pagamento agrícolas, denominado de *Environmental Land Management Scheme*. Nesse esquema, se prevê o pagamento para a recarbonização do solo para ajudar

a catalisar a transição do setor agrícola do Reino Unido para o *Net Zero* e garantir a entrega de bens e serviços ecossistêmicos (DEFRA, 2020b, 2020a). Espera-se que a curto prazo o preço do C continue ganhando força em todo o mundo e que uma adesão maior a prática de restauração e recuperação do solo com compensação, seja vista na Mata Atlântica.

5 – Conclusões

O uso do biocarvão no plantio de mudas, não contribui na sobrevivência de todas as espécies e teve efeito positivo somente para as mudas de *Cariniana legalis*. O mesmo ocorreu com o uso do hidrogel, que contribui apenas para sobrevivência das mudas de *Senna multijuga*. Mesmo com a baixa sobrevivência das mudas, a ação na área com o plantio já apresentou efeito positivo para a qualidade do solo, com destaque para a rápida restauração do C no solo. Essas mudanças em áreas degradadas na Mata Atlântica Brasileira podem gerar não só benefícios ambientais, mas também econômicos aos proprietários, considerando o fortalecimento de um mercado de C no país.

Conclusões gerais

Mesmo com toda a sua importância, os solos têm sido degradados por pressões antrópicas e estão atingindo limites críticos. A temática do SE apresenta uma oportunidade de transformação desse cenário, por isso a importância do aprimoramento e do debate da estrutura conceitual que informe todos os serviços prestados pelo solo, facilitando um melhor diálogo entre cientistas e tomadores de decisão. Além disso, esta temática contribui com métodos que envolvem a avaliação dos bens e serviços e sua valoração. Isto simboliza um caminho para se verificar e monitorar o cumprimento dos ODS's, visto que muitos deles estão relacionados aos solos.

Na região tropical, a temática precisa ser impulsionada visto que se verificou uma lacuna de conhecimento persistente nos estudos e projetos presentes nessa região. Para isso, é essencial atenção à definição do conceito de SE do solo e demais conceitos associados, tais como funções, processos e propriedades do solo, para que se ocorra adequadamente as etapas de avaliação a valoração. Espera-se que agências de financiamento apoiem mais projetos de SE do solo na região tropical nos próximos anos para que a classificação e os métodos se tornem cada vez mais robustos.

Este estudo também demonstra a importância de se analisar os solos em projetos de restauração nas etapas de planejamento, implementação e monitoramento. A restauração dos solos tem potencial para estar na vanguarda das práticas e políticas de combate às mudanças climáticas globais e contribuir para atingir as metas dos ODS's. Além disso, a restauração alinhada à temática dos SE do solo, pode promover maiores ganhos financeiros aos proprietários de terra através das compensações pela produção do serviço de estoque de carbono, baseados nos resultados deste estudo. Espera-se que estes resultados impulsionem a avaliação e valoração de outros SE, para que a comunidade científica e tomadores de decisão possuam uma visão holística das ações de recuperação dos ecossistemas. Ainda, tais projetos de restauração devem considerar o

contexto de paisagem para definir o manejo mais adequado dos solos, a fim de garantir que as gerações futuras tenham qualidade de vida.

Referências:

AB'SÁBER, Aziz. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades e paisagens**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

ADHIKARI, Kabindra; HARTEMINK, Alfred E. Geoderma Linking soils to ecosystem services — A global review. **Geoderma**, [S. l.], v. 262, p. 101–111, 2016. DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.

ADOLFO CAMPOS, C. et al. Soil water retention and carbon pools in tropical forested wetlands and marshes of the Gulf of Mexico. **Hydrological Sciences Journal**, v. 56, n. 8, p. 1388–1406, 2011. DOI: 10.1080/02626667.2011.629786.

AITKENHEAD, M. J.; ALBANITO, F.; JONES, M. B.; BLACK, H. I. J. Development and testing of a process-based model (MOSES) for simulating soil processes, functions and ecosystem services. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 20–22, p. 3795–3810, 2011. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.09.014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.09.014>.

ALCANTARA, Flávia. **Saber e Fazer Agroecologia**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, , 2016.

ALTHOFF, T. D. et al. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. **FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT**, v. 360, p. 367–375, 2016. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.10.001.

ALVARES, C. A. et al. Koppen ' s climate classification map for Brazil. v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ALVES-PINTO, H. N. et al. Economic Impacts of Payments for Environmental Services on Livelihoods of Agro-extractivist Communities in the Brazilian Amazon. **Ecological Economics**, v. 152, n. July, p. 378–388, 2018. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.05.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.05.016>.

BALÉE, W; ERICKSON, C. Time, complexity, and historical ecology. *In*: **Time and complexity in historical ecology: studies in the neotropical lowlands**. New York: Columbia University Press, 2006.

BALVANERA, Patricia et al. Ecosystem services research in Latin America: The state of the art. **Ecosystem Services**, v. 2, n. December, p. 56–70, 2012. a. DOI: 10.1016/j.ecoser.2012.09.006.

BALVANERA, P. et al. Ecosystem services research in Latin America 2.0: Expanding collaboration across countries, disciplines, and sectors.

Ecosystem Services, v. 42, n. March, p. 101086, 2020. DOI: 10.1016/j.ecoser.2020.101086. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101086>.

BANWART, S. Save our soils. **Nature**, v. 474, n. 7350, p. 151–152, 2011. DOI: 10.1038/474151a.

BAVEYE, P. C. Bypass and hyperbole in soil research: Worrisome practices critically reviewed through examples. **European Journal of Soil Science**, January, p. 1–20, 2020. DOI: 10.1111/ejss.12941.

BAVEYE, Philippe C.; BAVEYE, Jacques; GOWDY, John. Soil “ecosystem” services and natural capital: Critical appraisal of research on uncertain ground. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, n. JUN, p. 1–49, 2016. DOI: 10.3389/fenvs.2016.00041.

BENITES, V. M. et al. Estimativa da Densidade dos Solos Brasileiros, p. 26, 2006.

BLUM, W. E. H. Soil Protection Concept of the Council of Europe. **Soil and Groundwater Pollution**, p. 72–73, 1995. DOI: 10.1007/978-94-015-8587-3_17.

BLUM, Winfried E. H. Functions of soil for society and the environment. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 4, n. 3, p. 75–79, 2005. DOI: 10.1007/s11157-005-2236-x.

BOIVIN, N. L. et al. Ecological consequences of human niche construction: Examining long-term anthropogenic shaping of global species distributions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 113, n. 23, p. 6388–6396, 2016. DOI: 10.1073/pnas.1525200113.

BOLEY, J. D.; DREW, A. P.; ANDRUS, R. E. Effects of active pasture, teak (*Tectona grandis*) and mixed native plantations on soil chemistry in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 11, p. 2254–2261, 2009. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.02.035.

BOUMA, Johan. Soil security as a roadmap focusing soil contributions on sustainable development agendas. **Soil Security**, v. 1, n. October, p. 100001, 2020. DOI: 10.1016/j.soisec.2020.100001.

BRADY, M. V. et al. Roadmap for valuing soil ecosystem services to inform multi-level decision-making in agriculture. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 19, p. 1–20, 2019. DOI: 10.3390/su11195285.

BÜNEMANN, Else K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. September 2017, p. 105–125, 2018. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. **Model selection and inference. A practical information-theoretical approach.**

CALMON, M. et al. Emerging Threats and Opportunities for Large-Scale Ecological Restoration in the Atlantic Forest of Brazil. **Restoration Ecology**, v. 19, n. 2, p. 154–158, 2011. DOI: 10.1111/j.1526-100X.2011.00772.x.

CAMBRIDGE. **Dictionary**, 2020. Disponível em: <<http://www.dictionary.cambridge.org/pt/.com>> . Acesso em 12 nov. 2021

CAMPOS-SILVA, J. V; PERES, C. A. Community-based management induces rapid recovery of a high-value tropical freshwater fishery. **Scientific Reports**, v. 6, n. October, p. 1–13, 2016. DOI: 10.1038/srep34745. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/srep34745>.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. 1. ed. ed. Brasília.

CHAZDON, R. L.; GUARIGUATA, M. R. Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges. **Biotropica**, v. 48, n. 6, 2016. DOI: 10.1111/btp.12381.

CHOI, Y. D. Restoration ecology to the future: A call for new paradigm. **Restoration Ecology**, v. 15, n. 2, p. 351–353, 2007. DOI: 10.1111/j.1526-100X.2007.00224.x.

CLIMA TEMPO. Disponível em: <<http://www.climatempo.com>>. Acesso em 9 nov. 2021.

COLLINS, M. E.; KUEHL, R. J. Organic Matter Accumulation and Organic Soils. In: LEWIS (org.). **Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification**. Florida: Boca Raton, 2001. p. 137–161.

COSTA, T. G. et. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 37–45, 2014. DOI: 10.1590/S0104-77602014000100005.

COSTANZA, Robert et al. The value of the world ' s ecosystem services and natural capital. v. 387, n. May, p. 253–260, 1997.

COSTANZA, R. et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? **Ecosystem Services**, v. 28, p. 1–16, 2017. DOI: 10.1016/j.ecoser.2017.09.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>.

CROUZEILLES, R. et al. There is hope for achieving ambitious Atlantic Forest restoration commitments. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, n. 2, p. 80–83, 2019. DOI: 10.1016/j.pecon.2019.04.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.04.003>.

CROUZEILLES, R. et al. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. **Science Advances**, v. 3, n. 11, p. 1–8, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1701345.

CRUMLEY, C. Historical ecology: a multidimensional ecological orientation. *In: Historical ecology: cultural knowledge and changing landscape*. Santa Fe: School of American Research Press, 1994.

DAILY, G. C. Introduction: What are Ecosystem Service? *In: Nature's Services: Societal Dependence On Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997. p. 1–18.

DE ALMEIDA, Danilo Sette. **Recuperação Ambiental da Mata Atlântica**. 3º ed. Ilhéus: Editora UESC, 2016.

DE ALMEIDA, G. C. A. **Serviços Ecossistêmicos do solo sob sistemas agroflorestais: Estado da arte e estudo de caso em São Gonçalo - RJ**. 2019. UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, 2019. isponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1109924/1/DissertacaoGustavoCesarAraujoDeAlmeida2019.pdf>.

DE GRAAFF, M. A. et al. Labile soil carbon inputs mediate the soil microbial community composition and plant residue decomposition rates. **New Phytologist**, v. 188, n. 4, p. 1055–1064, 2010. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03427.x.

DE GROOT, R. S.; WILSON, M. A.; BOUMANS, R. M.J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological Economics**, v. 41, n. 3, p. 393–408, 2002. DOI: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7.

DEFRA. The Path to Sustainable Farming: An Agricultural Transition Plan 2021 to 2024. n. November 2020, p. 1–66, 2020. a. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/954283/agricultural-transition-plan.pdf.

DEFRA. Environmental Land Management: policy discussion document. **ELMS Consultation Document**, n. February, p. 38, 2020. b. Disponível em: https://consult.defra.gov.uk/elm/elmpolicyconsultation/supporting_documents/ELM_Policy_Discussion_Document_230620.pdf.

DEMETRIO, Wilian et al. Anthropogenic Soils Promote Biodiversity in Amazonian Rainforests. n. February, 2019. DOI: 10.1101/552364.

DIAZ, Sandra et al. **Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services**. Disponível em: <https://www.ipbes.net/news/ipbes/ipbes-global-assessment-summary-policymakers-pdf>.

DÍAZ, Sandra et al. The IPBES Conceptual Framework - connecting nature

and people. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 14, p. 1–16, 2015. DOI: 10.1016/j.cosust.2014.11.002.

DÍAZ, Sandra et al. Assessing nature's contributions to people. **Science**, v. 359, n. 6373, p. 270–272, 2018. DOI: 10.1126/science.aap8826.

DOMINATI, E.; MACKAY, A.; GREEN, S.; PATTERSON, M. A soil change-based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro-ecosystems: A case study of pastoral agriculture in New Zealand. **Ecological Economics**, v. 100, p. 119–129, 2014. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2014.02.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.008>.

DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858–1868, 2010. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2010.05.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>.

DOMINGUEZ-HAYDAR, Y.; ARMBRECHT, I. Response of Ants and Their Seed Removal in Rehabilitation Areas and Forests at El Cerrejón Coal Mine in Colombia. **Restoration Ecology**, v. 19, n. 201, p. 178–184, 2011. DOI: 10.1111/j.1526-100X.2010.00735.x.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa - SPI, Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018, 306 p.

EDWARDS, D. P.; et al. Conservation of Tropical Forests in the Anthropocene. **Current Biology**, v. 29, n. 19, p. R1008–R1020, 2019. DOI: 10.1016/j.cub.2019.08.026.

EHRENFELD, J. G.; RAVIT, B.; ELGERSMA, K. Feedback in the plant-soil system. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 30, p. 75–115, 2005. DOI: 10.1146/annurev.energy.30.050504.144212.

EHRlich, P. R.; EHRlich, A. H. **Extinction: The Causes and Consequences of the Disappearance of Species**. New York: Random House, 1981.

EHRlich, P. R.; MOONEY, H. A. Extinction, Substitution, and Ecosystem Services, v. 33, n. 4, p. 248–254, 1983.

EIP EUROPEAN INNOVATION PARTNERSHIP; SUSTAINABILITY, Agricultural Productivity and. Strategic Implementation Plan European Innovation Partnership " Agricultural Productivity and Sustainability ". n. July, p. 1–27, 2013.

ENGEL, V. L.; PARROTTA, J. A. Restauração ecológica de ecossistemas naturais. *In: Restauração ecológica de ecossistemas naturais*.

Botucatu. p. 340.

EUROPEAN COMMISSION. **The implementation of the Soil Thematic Strategy and ongoing activities**. Disponível em: <<https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX:52012DC0046>>. Acesso em: 12 out. 2021

FAO. **The state of the world's land and water resources - Managing systems at risk**. Rome and London. Disponível em: . Acesso em: 08 abril 2019

FAO. **Part 3: Feeding the world FAO Statistical Yearbook 2013**. Disponível em: . Acesso em: 08 abril 2019

FAO. **Status of the World's Soil Resources**. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>>. Acesso em: 8 de abril 2019

FAO. **Recarbonisation of global soils: tool to support the implementation of the Koronivia Joint Work on Agriculture**. Disponível em: < <https://www.fao.org/publications/card/en/c/CA6522EN/>> . Acesso em: 23 junho 2020

FISHER, B.; TURNER, R. K.; MORLING, P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. **Ecological Economics**, v. 68, n. 3, p. 643–653, 2009. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.09.014.

FONSECA, L. et al. Viabilidade do Hidrogel na Recuperação de Cerrado sensu stricto com Espécies Nativas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, n. 0, 2017. DOI: 10.1590/2179-8087.022716.

FORNES, F.; BELDA, R. M. Use of raw and acidified biochars as constituents of growth media for forest seedling production. **New Forests**, v. 50, n. 6, p. 1063–1086, 2019. DOI: 10.1007/s11056-019-09715-y.

GARCIA, M. F. et al. Variação radial da densidade básica e comprimento de fibras de diferentes procedências de Cariniana Legalis. **IF Sér. Reg.**, n. 1, p. 75–80, 2009.

GARDNER, T. A. et al. A social and ecological assessment of tropical land uses at multiple scales: The Sustainable Amazon Network. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, 2013. DOI: 10.1098/rstb.2012.0166.

GLASER, B. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 362, n. 1478, p. 187–96, 2006. DOI: 10.1098/rstb.2006.1978.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E. et al. The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment

schemes. **Ecological Economics**, v. 69, n. 6, p. 1209–1218, 2010. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.11.007.

GRIMM, N. B. et al. Global change and the ecology of cities. **Science**, v. 319, n. 5864, p. 756–760, 2008. DOI: 10.1126/science.1150195.

HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. Common International Classification of Ecosystem Goods and Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012. EEA Framework Contract No EEA/IEA/09/003. **Contract**, p. 30, 2010. . Disponível em: <www.cices.eu.>. Acesso em: 16 set. 2021

HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. CICES V5. 1. Guidance on the Application of the Revised Structure - Guidance on the Application of the Revised Structure. **Cices**, n. January, p. 53, 2018. Disponível em: <https://cices.eu/resources/>. Acesso em: 16 set. 2021

HARRISON, R.; STRAHM, B.; XIU YI. Soil Education and Public Awareness. *In*: **Soils, Plant Growth and Crop Production - Volume III**. p. 283–306. DOI: 10.1007/978-3-642-25995-1_12.

HAYNES, Winston. Tukey's Test. *In*: DUBITZKY W., WOLKENHAUER O., CHO KH., Yokota H. (org.). **Encyclopedia of Systems Biology**. New York: Springer, 2013. p. 1–2.

HEWITT, A. et al. Soil natural capital quantification by the stock adequacy method. **Geoderma**, v. 241–242, p. 107–114, 2015. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.11.014.

HIGGS, E. et al. The changing role of history in restoration ecology. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 12, n. 9, p. 499–506, 2014. DOI: 10.1890/110267.

HILLEL, Daniel. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 2011.

HOLL, K. D. Factors limiting tropical rain forest regeneration in abandoned pasture: Seed rain, seed germination, microclimate, and soil. **Biotropica**, v. 31, n. 2, p. 229–242, 1999. DOI: 10.1111/j.1744-7429.1999.tb00135.x.

HONG, S.; GAN, P.; CHEN, A. Environmental controls on soil pH in planted forest and its response to nitrogen deposition. **Environmental Research**, v. 172, n. October 2018, p. 159–165, 2019. DOI: 10.1016/j.envres.2019.02.020.

IPBES. Media Release: Biodiversity and Nature's Contributions Continue Dangerous Decline, Scientists Warn. **Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)**, [S. l.], p. 1–13, 2018. Disponível em: <https://www.ipbes.net/news/biodiversity-nature's-contributions-continue-dangerous-decline-scientists-warn.>.

Acesso em: 22 out 2020

IPBES. Nature's Dangerous Decline 'Unprecedented'; Species Extinction Rates 'Accelerating' | IPBES. p. 1–9, 2019. Disponível em: <<https://www.ipbes.net/news/Media-Release-Global-Assessment.>> Acesso em: 22 out 2020

IPCC. Land use, land-use change and forestry. **Land Use, Land-use Change and Forestry**, p. 1–160, 2000. DOI: 10.4337/9781849805834.00023.

JOHNSON, D. L.; SCHAETZL, R. J. Differing views of soil and pedogenesis by two masters: Darwin and Dokuchaev. **Geoderma**, v. 237, p. 176–189, 2015. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.08.020.

JOLY, C. A.; METZGER, J. P.; TABARELLI, M.. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: Ecological findings and conservation initiatives. **New Phytologist**, v. 204, n. 3, p. 459–473, 2014. DOI: 10.1111/nph.12989.

JOLY, C. A.; et al. Biodiversity conservation research, training, and policy in são paulo. **Science**, v. 328, n. 5984, p. 1358–1359, 2010. DOI: 10.1126/science.1188639.

JONES, I. L. et al. Above- and belowground carbon stocks are decoupled in secondary tropical forests and are positively related to forest age and soil nutrients respectively. **Science of the Total Environment**, v. 697, p. 133987, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133987

JÓNSSON, J. Ö. G.; DAVÍÐSDÓTTIR, B.; NIKOLAIDIS, N. P. **Valuation of Soil Ecosystem Services**. 1. ed: Elsevier Inc., 2017. v. 142 DOI: 10.1016/bs.agron.2016.10.011.

JÓNSSON, J. Ö. G.; DAVÍÐSDÓTTIR, B. Classification and valuation of soil ecosystem services. **Agricultural Systems**, v. 145, p. 24–38, 2016. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.02.010.

JUNO, E.; IBÁÑEZ, I. Biochar application and soil transfer in tree restoration: A meta-analysis and field experiment. **Ecological Restoration**, v. 39, n. 3, p. 158–167, 2021. DOI: 10.3368/er.39.3.158.

KEENOR, S. G. et al. Capturing a soil carbon economy. **Royal Society Open Science**, v. 8, n. 4, 2021. DOI: 10.1098/rsos.202305.

KESSTRA, S. D. et al. Soil as a filter for groundwater quality. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 507–516, 2012. DOI: 10.1016/j.cosust.2012.10.007.

KESSTRA, S. D. et al. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals. **Soil**, v. 2, n. 2, p. 111–128, 2016. DOI: 10.5194/soil-2-111-2016.

KEITH, H. et al. Accounting for carbon stocks and flows: storage and sequestration are both ecosystem services. October, p. 7–10, 2019.

KERFAHI, D. et al. The Impact of Selective-Logging and Forest Clearance for Oil Palm on Fungal Communities in Borneo. *PLOS ONE*, v. 9, n. 11, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0111525.

KERN, D. C. et al. Terras pretas: Approaches to formation processes in a new paradigm. **Geoarchaeology**, v. 32, n. 6, p. 694–706, 2017. DOI: 10.1002/gea.21647.

KJELDAHL, J. A New Method for the Determination of Nitrogen in Organic Matter. **Zeitschrift für Analytische Chemie**, p. 366–382, 1883.

KLEBER, M. What is recalcitrant soil organic matter? **Environmental Chemistry**, v. 7, n. 4, p. 320–332, 2010. DOI: 10.1071/EN10006.

KONDOLF, G. M.; PODOLAK, K. Space and time scales in humanlandscape systems. **Environmental Management**, v. 53, n. 1, p. 76–87, 2014. DOI: 10.1007/s00267-013-0078-9.

KRASILNIKOV, P.; ARNOLD, R. W.; IBÁÑEZ, J. J. Soil classifications: Their origin, the state-of-the-art and perspectives. **19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World**, n. August, p. 19–22, 2010.

KUBISZEWSKI, I. et al. The Future of Ecosystem Services in Asia and the Pacific. **Asia and the Pacific Policy Studies**, v. 3, n. 3, p. 389–404, 2016. DOI: 10.1002/app5.147.

KUNITO, T. et al. Aluminum and acidity suppress microbial activity and biomass in acidic forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 97, p. 23–30, 2016. DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.02.019.

LABRIÈRE, N. et al. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 203, p. 127–139, 2015. DOI: 10.1016/j.agee.2015.01.027.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security, v. 304, n. June, p. 1623–1627, 2004.

LAL, R. et al. Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. **Geoderma Regional**, v. 25, 2021. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00398.

LATAWIEC, A. E.; et al. More effort is needed to implement and disseminate soil protection measures for tropical soils. **Environmental Research Letters**, 2020.

LATAWIEC, A. E. et al. Creating space for large-scale restoration in tropical

91 agricultural landscapes. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 13, n. 4, p. 211–218, 2015. DOI: 10.1890/140052.

LATAWIEC, A. E. et al. Suriname: Reconciling agricultural development and conservation of unique natural wealth. **Land Use Policy**, v. 38, p. 627–636, 2014. DOI: 10.1016/j.landusepol.2014.01.007.

LATAWIEC, A. E. et al. Games and the Communication of Ecosystem Services to Non-Scientific Audiences. **Mod Concep Dev Agrono**, v. 4, n. 5, p. 476–477, 2019. DOI: 10.31031/MCDA.2019.04.000598.

LATHUILLIERE, M. J. et al. Land occupation and transformation impacts of soybean production in Southern Amazonia, Brazil. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, v. 149, p. 680–689, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.120.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management : An introduction. **Biochar for Environmental Management - Science and Technology**, v. 1, p. 1–12, 2009. DOI: 10.1016/j.forpol.2009.07.001.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2° ed. São Paulo.

LEWIS, S. L.; EDWARDS, D. P.; GALBRAITH, D. Increasing human dominance of tropical forests. **Science**, v. 349, n. 6250, p. 827–832, 2015.

MEA. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis** (Rashid Hassan, Neville Ash, Robert Scholes, Org.). Washington DC. 2005. MELLO, T. J.;

OLIVEIRA, A. A. Making a bad situation worse: An invasive species altering the balance of interactions between local species. **PLoS ONE**, v. 11, n. 3, p. 1–17, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0152070.

MENDES, M. S. et al. Look down — there is a gap — the need to include soil data in Atlantic Forest restoration. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 2, p. 361–370, 2018. DOI: 10.1111/rec.12875.

MERTEN, J. et al. Water scarcity and oil palm expansion: social views and environmental processes. **Ecology and Society**. 21, n. 2, 2016. DOI: 10.5751/ES-08214-210205.

MINASNY, B. et al. **Dynamics of soil carbon sequestration under oil palm plantations of different ages**. 2013. 128 p. Dissertação. University of Ghana, 2013.

MINASNY, et al. Pedometrics research in the vadose zone-Review and perspectives. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 4, 2013. DOI: 10.2136/vzj2012.0141.

MMA/ICMBIO. Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa. Disponível em: 92 . Acesso em: 09 abril 2021

MORRISON, E. B.; LINDELL, C. A. Active or Passive Forest Restoration? Assessing Restoration Alternatives with Avian Foraging Behavior. **Restoration Ecology**, v. 19, n. 201, p. 170–177, 2011. DOI: 10.1111/j.1526-100X.2010.00725.x.

MURPHY, B. Key soil functional properties affected by soil organic matter - Evidence from published literature. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 25, n. 1, 2015. DOI: 10.1088/1755-1315/25/1/012008

NEUMANN-COSEL, L. et al. Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures - A case study from Panama. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 10, p. 1625–1633, 2011. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.07.023.

NEVES, E. G. et al. Historical and Socio-cultural Origins of Amazonian Dark Earth. In: **Amazonian Dark Earths**. 1.ed. United State of America, 2003. DOI: 10.1007/1-4020-2597-1.

NOGUEIRA, L. R. et al. Biological Properties and Organic Matter Dynamics of Soil in Pasture and Natural Regeneration Areas in the Atlantic Forest Biome. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 0, p. 1–13, 2016. DOI: 10.1590/18069657rbcS20150366.

NOLAN, M. et al. From the ground up: prioritizing soil at the forefront of ecological restoration. **Restoration Ecology**, p. 1–5, 2021. DOI: 10.1111/rec.13453.

NORMAN M., et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 24, p. 853–862, 2000. DOI: 10.1038/35002501.

NOVAK, E. et al. Changes in the soil structure and organic matter dynamics under different plant covers. **Cerne**, v. 25, n. 2, p. 230–239, 2019. DOI: 10.1590/01047760201925022618.

NOVOTNY, Etelvino H. et al. Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the utilisation of charcoal for soil amendment. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 6, p. 1003–1010, 2009. DOI: 10.1590/S0103-50532009000600002.

NOVOTNY, E. H. et al. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use - a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solos**, v. 39, n. 1, p. 321–344, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbcS20140818.

OLA, O. et al. Determinants of the environmental conservation and poverty alleviation objectives of Payments for Ecosystem Services (PES) programs. **Ecosystem Services**, v. 35, n. November 2017, p. 52–66, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.10.011.

OLIVEIRA, R. R. FRAGA, J. S.; BERCK, D. E. Uma floresta de vestígios: metabolismo social e a atividade de carvoeiros nos séculos XIX e XX no Rio de Janeiro, RJ. **Revista Internacional Interdisciplinar INTERthesis**, v. 8, n. 2, p. 286–315, 2011. DOI: 10.5007/1807-1384.2011v8n2p286.

OLSSON, L. **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems** Ipcc. DOI: 10.4337/9781784710644.00020.

ONTL, T. Soil Carbon Storage. **Soil Carbon Storage**, June, 2018. DOI: 10.1016/c2016-0-03949-9.

ORGIAZZI, A. et al. A knowledge-based approach to estimating the magnitude and spatial patterns of potential threats to soil biodiversity. **Science of the Total Environment**, v. 545–546, p. 11–20, 2016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.092.

OXFORD ENGLISH DICTIONARY. 2019 Disponível em: Acesso em: 25 abril 2019

PANIAGUA-RAMIREZ, A. et al. Carbon storage estimation in a secondary tropical forest at CIEE Sustainability Center, Monteverde, Costa Rica. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–8, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-03004-5.

PARROTTA, J. A.; TURNBULL, J. W.; JONES, N. **Catalizing native forest regeneration on native tropical lands** *Forest Ecology and Management*, 1997.

PASCUAL, U.; TERMANSEN, M.; ABSON, D. J. The economic value of soil carbon. **Soil carbon: science, management and policy for multiple benefits**, December, p. 179–187, 2014. DOI: 10.1079/9781780645322.0179.

PASCUAL, U. et al. Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 26–27, p. 7–16, 2017. DOI: 10.1016/j.cosust.2016.12.006.

PIRES, A. F. et al. Biodiversity research still falls short of creating links with ecosystem services and human well-being in a global hotspot. **Ecosystem Services**, v. 34, n. March, p. 68–73, 2018. DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.10.001.

PIRES, M. O. Programas Agrícolas Na Ocupação Do Cerrado. **Sociedade e Cultura**, v. 3, n. 1, p. 111–131, 2007. DOI: 10.5216/sec.v3i1.459. 94

PITSON, C., et al. AgriPoliS - Agricultural Policy Simulator. **Leibniz Institute of Agricultural Development in Transition Economies (IAMO)** Germany, 2020. Disponível em: . Acesso em: 10 abril 2020

PORTELA, R.; RADEMACHER, I. A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services. **ECOLOGICAL MODELLING**, v. 143, n. 1–2, p. 115–146, 2001. DOI: 10.1016/S0304-3800(01)00359-3.

POWERS, J. S.; MARÍN-SPIOTTA, E. Ecosystem Processes and Biogeochemical Cycles in Secondary Tropical Forest Succession. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 48, p. 497–519, 2017. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-110316-022944.

PRADO, R. B. et al. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1021–1038, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000900002.

PREISKORN, G. M.; COUTO, H. T. Z. Quantificação e monitoramento da biomassa e carbono em plantios de áreas restauradas. *In: Pacto pela Restauração da Mata Atlântica - referencial dos conceitos e ações de restauração florestal*. p. 147–157. DOI: 10.1007/s10584-006-9174-7.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R : A Language and Environment for Statistical Computing**. 2020

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

RANGER, J. Forest Soils: Characteristics and Sustainability. *In: BERTHELIN, J., VALENTIN, C., MUNCH, J.C., Eds. (org.). Soils as a Key Component of the Critical Zone 1: Functions and Services*. London: Hoboken, 2018. p. 163–186.

RAY, D. K. et al. Recent patterns of crop yield growth and stagnation. **Nature Communications**, v. 3, p. 1–7, 2012. DOI: 10.1038/ncomms2296.

REBELLATO, L.; WOODS, W. I.; NEVES, E. G. Pre-Columbian Settlement Dynamics. **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision**, p. 15–31, 2009.

RÊGO, G. M.; POSSAMAI, E. **Efeito do Substrato e da Temperatura sobre a Germinação e Vigor de Sementes do Jequitibá-Rosa (Cariniana legalis)**. 2004. DOI: 1517-5030.

REZENDE, C. L. et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, October, 2018. DOI: 10.1016/j.pecon.2018.10.002.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009. DOI:

10.1016/j.biocon.2009.02.021.

ROBINSON, D. A. et al. Natural Capital, Ecosystem Services, and Soil Change: Why Soil Science Must Embrace an Ecosystems Approach. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 1, 2012. DOI: 10.2136/vzj2011.0051.

ROBINSON, D. A. et al. Advances in Soil Ecosystem Services: Concepts, Models, and Applications for Earth System Life Support. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 4, p. 0, 2013. DOI: 10.2136/vzj2013.01.0027.

RODRIGUES, A. F. **O efeito do biocarvão em mudas da Mata Atlântica : uma análise ambiental e socioeconômica**. 2017. 105 p. Dissertação - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio.

RODRIGUES, A. F. et al. Humic acid composition and soil fertility of soils near an ancient charcoal kiln: are they similar to Terra Preta de Índios soils? **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, n. 3, p. 1374–1381, 2018. DOI: 10.1007/s11368-018-2162-5.

RODRIGUES, N. J. R., L. et al. Soil dynamics and carbon stocks 10 years after restoration of degraded land using Atlantic Forest tree species. **Forest Systems**, v. 20, n. 3, p. 536, 2011. DOI: 10.5424/fs/20112003-11844.

ROMÁN-DAÑOBEYTIA, F. et al. Survival and early growth of 51 tropical tree species in areas degraded by artisanal gold mining in the Peruvian Amazon. **Ecological Engineering**, v. 159, n. November 2020, 2021. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.106097.

RUIZ-JAÉN, M. C.; AIDE, T. M. Vegetation structure, species diversity, and ecosystem processes as measures of restoration success. **Forest Ecology and Management**, v. 218, n. 1–3, p. 159–173, 2005. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.07.008.

RUMPEL, C. et al. The 4p1000 initiative: Opportunities, limitations and challenges for implementing soil organic carbon sequestration as a sustainable development strategy. **Ambio**, v. 49, n. 1, p. 350–360, 2020. DOI: 10.1007/s13280-019-01165-2.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema Radicular de Plantas e Qualidade do Solo Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1005326>>. Acesso em: 09 abril 2020

SANDERMAN, J.; HENGL, T.; FISKE, G. J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. v. 115, n. 7, 2018. DOI: 10.1073/pnas.1800925115.

SANNINO, A.; DEMITRI, C.; MADAGHIELE, M.. Biodegradable cellulosebased hydrogels: Design and applications. **Materials**, v. 2, n. 2, p.

353–373, 2009. DOI: 10.3390/ma2020353.

SANSOLO, D. G. Significados da paisagem como categoria de análise geográfica. In: 2007, Niterói. **Anais**. Niterói: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, 2007.

SANTOS, J. S. et al. Landscape ecology in the Anthropocene: an overview for integrating agroecosystems and biodiversity conservation. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 1, p. 21–32, 2021. DOI: 10.1016/j.pecon.2020.11.002.

SCARANO, F. R. et al. Increasing effectiveness of the science-policy interface in the socioecological arena in Brazil. **Biological Conservation**, v. 240, n. August, p. 108227, 2019. DOI: 10.1016/j.biocon.2019.108227.

SCHRÖTER, M. Ecosystem Services as a Contested Concept: A Synthesis of Critique and Counter-Arguments. **Conservation Letters**, v. 7, n. 6, p. 514–523, 2014. DOI: 10.1111/conl.12091.

SCHULTE, R. P. O. et al. Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. **Environmental Science and Policy**, v. 38, p. 45–58, 2014. DOI: 10.1016/j.envsci.2013.10.002.

SER. **Padrões internacionais para a prática da restauração ecológica - Incluindo princípios e conceitos chaves**. 1. ed. Washington, D.C. 2016

SIMONSON, R. W. Shifts in the usefulness of soil resources in the USA. **Agriculture**, v. 23, p. 11–15, 1966.

SIREGAR, C. A. Effect of Charcoal Application on The Early Growth Stage of *Acacia mangium* and *Michelia montana*. **Indonesian Journal of Forestry Research**, v. 4, n. 1, p. 19–30, 2007. DOI: 10.20886/ijfr.2007.4.1.19-30.

SIX, J. et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. **Agronomie**, v. 22, n. 7–8, p. 755–775, 2002. DOI: 10.1051/agro.

SOARES-FILHO, B. et al. Cracking Brazils Forest Code. **Science**, v. 344, n. 6182, p. 363 LP – 364, 2014.

SOBANSKI, N.; MARQUES, M. C. M. Effects of soil characteristics and exotic grass cover on the forest restoration of the Atlantic Forest region. **Journal for Nature Conservation**, v. 22, n. 3, p. 217–222, 2014. DOI: 10.1016/j.jnc.2014.01.001.

SOLORZANO, A.; OLIVEIRA, R. R.; LAZOS-RUIZ, A.D. Landscape reading methodology of urban forests: interpreting past and current socioecological

interactions in Rio de Janeiro. **Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC): revista de la Solcha**, v. 6, n. 1, p. 211–224, 2016. DOI: 10.5935/2237-2717.20160011.

SOUSA, G. T O. et al. Incorporação de polímero hidroretentor no substrato de produção de mudas de *Anadenanthera peregrina* (L.) Spieg. *Enciclopédia Biosfera*, v. 9, n. 16, p. 1270–1278, 2013.

SOUSSANA, J. F. et al. Matching policy and science: Rationale for the ‘4 per 1000 - soils for food security and climate’ initiative. *Soil and Tillage Research*, v. 188, n. December, p. 3–15, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2017.12.002.

STAMATI, F. E.; NIKOLAIDIS, N. P.; SCHNOOR, J. L. Modeling topsoil carbon sequestration in two contrasting crop production to set-aside conversions with RothC - Calibration issues and uncertainty analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 165, p. 190–200, 2013. DOI: 10.1016/j.agee.2012.11.010.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P. J.; MCNEILL, J. R. The Anthropocene Are Humans Now an overwhelming force of nature. **Ambio**, v. 36, n. 8, p. 614–621, 2007.

STRANBERRY L. *Generalized Linear Models*, 2013.

STRASSBURG, B. B. N. et al. The role of natural regeneration to ecosystem services provision and habitat availability: a case study in the Brazilian Atlantic Forest. **Biotropica**, v. 48, n. 6, p. 890–899, 2016. DOI: 10.1111/btp.12393.

STRASSBURG, Bernardo B. N. et al. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, n. 1, p. 84–97, 2014. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001.

SUKHDEV, P. et al. **A economia dos ecossistemas e da Biodiversidade: Integrando a economia da natureza. uma síntese da abordagem, conclusões e recomendações do TEEB**. Disponível em: . Acesso em: 10 abril 2018

SYVITSKI, J. P. M. et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. **Science**, v. 308, n. 5720, p. 376–380, 2005. DOI: 10.1126/science.1109454.

TABARELLI, M. et al. Desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade na Mata Atlântica brasileira. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 132–138, 2005. DOI: 10.1590/S0102-05362005000400034.

TAMM, Adriano. **Quem chega primeiro? Análise do processo de**

colonização vegetal na Mata Atlântica. 2022. 36 p. Monografia - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio.

TEEB. **A Economia dos Sistemas e da Biodiversidade: Integrando a Economia da Natureza. Uma síntese da abordagem, conclusões e recomendações do TEEB.** Disponível em: . Acesso em: 07 abril 2018

THAKUR, V. K.; THAKUR, M. K. Recent advances in green hydrogels from lignin: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 72, p. 834–847, 2015. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2014.09.044.

THERNEAU, T. A package for survival analysis in R. R package version 3.1-12.

THOMAS, D. S. Hydrogel applied to the root plug of subtropical eucalypt seedlings halves transplant death following planting. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 3–4, p. 1305–1314, 2008. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.10.035.

THOMAS, S. C.; GALE, N. Biochar and forest restoration : a review and meta- analysis of tree growth responses. **New Forests**, v. 46, n. 5, p. 931–946, 2015. DOI: 10.1007/s11056-015-9491-7.

TIAN, Q. et al. Factors controlling soil organic carbon stability along a temperate forest altitudinal gradient. **Scientific Reports**, v. 6, n. November 2015, p. 1–9, 2016. DOI: 10.1038/srep18783.

TÓTH, G. et al. Monitoring soil for sustainable development and land degradation neutrality. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 2, 2018. DOI: 10.1007/s10661-017-6415-3.

TURNER, R. K.; DAILY, G. C. The ecosystem services framework and 99 natural capital conservation. **Environmental and Resource Economics**, v. 39, n. 1, p. 25–35, 2008. DOI: 10.1007/s10640-007-9176-6.

UN-REDD. Fact Sheet: About REDD+. **UN-REED Programme**, p. 4, 2016. Disponível em: . Acesso em: 19 dez 2021 UN DESA. World population prospects 2019. Disponível em: . Acesso em 10 dez. 2021

UNDP. Overview: Human Development Report 2016. **United Nations Development Programme**, p. 30, 2019. Disponível em: . Acesso em 10 dez. 2021

UNITED NATION. statistical Yearbook 2019 edeition. v. 67, n. 62

VALENTE, R. A. et al. A multicriteria evaluation approach to set forest restoration priorities based on water ecosystem services. **Journal of Environmental Management**, v. 285, n. January, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112049.

VAN DER PLOEG, R. R.; BÖHM, W.; KIRKHAM, M. B. On the Origin of the Theory of Mineral Nutrition of Plants and the Law of the Minimum. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1055–1062, 1999. DOI: 10.2136/sssaj1999.6351055x.

VERMEULEN, S. J.; CAMPBELL, B. M.; INGRAM, J. S. I. Climate change and food systems. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 37, p. 195–222, 2012. DOI: 10.1146/annurev-environ-020411-130608.

VICENTE-VICENTE, J. L; et al. A holistic view of soils in delivering ecosystem services in forests: A case study in South Korea. **Forests**, v. 10, n. 6, p. 1–19, 2019. DOI: 10.3390/f10060487.

VIHERVAARA, P.; RÖNKÄ, M.; WALLS, M. Trends in ecosystem service research: Early steps and current drivers. **Ambio**, v. 39, n. 4, p. 314–324, 2010. DOI: 10.1007/s13280-010-0048-x.

WALLACE, K. J. Classification of ecosystem services: Problems and solutions. **Biological Conservation**, v. 139, n. 3–4, p. 235–246, 2007. DOI: 10.1016/j.biocon.2007.07.015.

WANG, Y. et al. Major forest increase on the Loess Plateau, China (2001–2016). **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 11, p. 4080–4091, 2018. DOI: 10.1002/ldr.3174.

WANGAI, P. W.; BURKHARD, B.; MULLER, F. Gulf Organisation for Research and Development A review of studies on ecosystem services in 100 Africa. p. 225–245, 2016. DOI: 10.1016/j.ijsbe.2016.08.005.

WEN, Z. et al. Functional diversity overrides community-weighted mean traits in linking land-use intensity to hydrological ecosystem services. **SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT**, v. 682, p. 583–590, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.160.

WILLIS, K. J.; BHAGWAT, S. A. Biodiversity and climate change. **Science**, v. 326, n. 5954, p. 806–807, 2009. DOI: 10.1126/science.1178838.

WOMACK, N. C. et al. Hydrogel application for improving soil pore network in agroecosystems. Preliminary results on three different soils. **Catena**, v. 208, n. September 2021, p. 105759, 2022. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105759.

WOODS, W. Os Solos e as Ciências Humanas : Interpretação do Passado. In: **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. p. 62–71.

WORLD BANK. Report of the High-Level Commission on Carbon Prices, 2019.

YOSHIMURA, N.; HIURA, T. Demand and supply of cultural ecosystem

services: Use of geotagged photos to map the aesthetic value of landscapes in Hokkaido. **Ecosystem Services**, v. 24, p. 68–78, 2017. DOI: 10.1016/j.ecoser.2017.02.009.

ZALASIEWICZ, J. et al. The anthropocene: A new epoch of geological time? **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 369, n. 1938, p. 835–841, 2011. DOI: 10.1098/rsta.2010.0339.

ZHANG, H. et al. Recovery in soil carbon stock but reduction in carbon stabilization after 56-year forest restoration in degraded tropical lands. **Forest Ecology and Management**, v. 441, n. February, p. 1–8, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.03.037.

ZHAO, Z. et al. Distribution characteristics and seasonal variation of soil nutrients in the Mun River Basin, Thailand. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 9, 2018. DOI: 10.3390/ijerph15091818.

ZHENG, H. et al. Realizing the values of natural capital for inclusive, sustainable development: Informing China's new ecological development strategy. **PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA**, v. 116, n. 17, p. 8623–8628, 2019. DOI: 10.1073/pnas.1819501116.

ZIEMBICKI, M.; LOCKIE, S. Implications of an expanding and intensifying tropical zone for the sustainable development agenda. **United Nations Sustainable Development Knowledge Platform**, 3p, 2016.

Anexos

Anexo 1 – Forno utilizado para a pirólise da biomassa de *Gliricidia sepium* (jacq.) Kunth ex Walp usada para a produção de biocarvão



Anexo 2 - Função de predição utilizada para se aferir a densidade do solo de acordo com Benites et al. 2006

Densidade (g cm^{-3} ou Mg m^{-3}) = $1,5688 - (0,0005 \times \text{argila}) - (0,0090 \times \text{COS})$

Apêndices

Apêndice 1 – Informações dos estudos incluídos na análise da revisão sistemática

Id	Referências	Ano
2	Althoff, T. D. et al. 2016. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil.	2016
3	Ashford, O. S. et al. 2013. Litter manipulation and the soil arthropod community in a lowland tropical rainforest.	2013
6	Bhomia, R. K et al. 2019. Impacts of <i>Mauritia flexuosa</i> degradation on the carbon stocks of freshwater peatlands in the Pastaza-Maranon river basin of the Peruvian Amazon.	2019
11	Barliza, C. et al. 2018. Recovery of biogeochemical processes in restored tropical dry forest on a coal mine spoil in La Guajira, Colombia.	2018
22	Coulibaly, T. et al. 2016. Change in termite communities along a chronosequence of mango tree orchards in the north of Côte d'Ivoire.	2016
23	da Silva, I. R. et al. 2017. Patterns of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Distribution on Mainland and Island Sandy Coastal Plain Ecosystems in Brazil.	2017
28	de Souza, H. N. et al. 2012. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome.	2012
31	Ditt, E. H. et al. 2010. Forest conversion and provision of ecosystem services in the Brazilian Atlantic forest.	2010
33	Dominguez-Haydar, Y. et al. 2011. Response of Ants and Their Seed Removal in Rehabilitation Areas and Forests at El Cerrejon Coal Mine in Colombia.	2011
35	Dosso, K. et al. 2013. Changes in the termite assemblage across a sequence of land-use systems in the rural area around Lamto Reserve in central Cte d'Ivoire.	2013
39	Fan, Y. et al. 2019. Reconciling Canopy Interception Parameterization and Rainfall Forcing Frequency in the Community Land Model for Simulating Evapotranspiration of Rainforests and Oil Palm Plantations in Indonesia.	2019
44	Hamel, P. et al. 2017. Sediment delivery modeling in practice: Comparing the effects of watershed characteristics and data resolution across hydroclimatic regions.	2017
48	Kerfahi, D. et al. 2014. The Impact of Selective-Logging and Forest Clearance for Oil Palm on Fungal Communities in Borneo.	2014

52	Lambin, E. F. et al. 2013. Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach.	2013
53	Lathuilliere, M. J et al. 2017. Land occupation and transformation impacts of soybean production in Southern Amazonia, Brazil.	2017
56	Lawes, M. J. et al. 2015. The effects of a moratorium on land-clearing in the Douglas-Daly region, Northern Territory, Australia.	2015
60	Maass, J. M. et al. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: Insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico.	2005
61	Machado, J. et al. 2019. Soil natural capital vulnerability to environmental change. A regional scale approach for tropical soils in the Colombian Andes.	2019
65	Marichal, R. et al. 2014. Soil macro invertebrate communities and ecosystem services in deforested landscapes of Amazonia.	2014
68	Meli, P. et al. 2017. A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery.	2017
78	Nath, A. J. et al. 2017. Managing tropical wetlands for advancing global rice production: Implications for land-use management.	2017
81	Ninan, K. N. et al. 2013. Valuing forest ecosystem services: What we know and what we don't.	2013
84	Palin, O. F. et al. 2011. Termite Diversity along an Amazon-Andes Elevation Gradient, Peru.	2011
88	Portela, R. et al. 2001. A dynamic model of patterns of deforestation and their effect on the ability of the Brazilian Amazonia to provide ecosystem services.	2001
90	Rousseau, L. et al. 2013. Soil macrofauna as indicators of soil quality and land use impacts in smallholder agroecosystems of western Nicaragua .	2013
92	Sanabria, C. et al. 2014. Ants as indicators of soil-based ecosystem services in agroecosystems of the Colombian Llanos.	2014
96	Schubert, H. et al. 2018. Assessment of Land Cover Changes in the Hinterland of Barranquilla (Colombia) Using Landsat Imagery and Logistic Regression.	2018
99	Sistla, S A. et al. 2016. Agroforestry Practices Promote Biodiversity and Natural Resource Diversity in Atlantic Nicaragua.	2016
103	Teuscher, M. et al. 2016. Experimental Biodiversity Enrichment in Oil-Palm-Dominated Landscapes in Indonesia.	2016
105	Trilleras, J. M. et al. 2015. Effects of livestock management on the supply of ecosystem services in pastures in a tropical dry region of western Mexico.	2015

108	Wen, Z. et al. 2019. Functional diversity overrides community-weighted mean traits in linking land-use intensity to hydrological ecosystem services.	2019
109	Wenger, A. et al. 2018. Predicting the impact of logging activities on soil erosion and water quality in steep, forested tropical islands.	2018
120	Zheng, H. et al. 2019. Realizing the values of natural capital for inclusive, sustainable development: Informing China's new ecological development strategy.	2019
121	Baruch, Z. et al. 2019. Ecosystem dynamics and services of a paired Neotropical montane forest and pine plantation.	2019
122	Macedo, Y. et al. 2017. Serviços ambientais das unidades geoambientais no município de São Miguel do Gostoso/RN, Brasil.	2017
127	Campos, A. et al. 2011. Soil water retention and carbon pools in tropical forested wetlands and marshes of the Gulf of Mexico.	2011
135	Chanlabut, U. et al. 2019. Soil Organic Carbon Stocks across Hydrologic Schemes in Freshwater Wetlands of the Chi River Basin, Northeast Thailand.	2019
148	Ponette-González, A.G. et al. 2010. Water inputs across a tropical montane landscape in Veracruz, Mexico: Synergistic effects of land cover, rain and fog seasonality, and interannual precipitation variability.	2010
151	Benayas et al. 2009. Enhancement of Biodiversity and Ecosystem Services by Ecological Restoration: A Meta-Analysis.	2009
157	Vesala, R. et al. 2017. Diversity of fungus-growing termites (Macrotermes) and their fungal symbionts (Termitomyces) in the semiarid Tsavo Ecosystem, Kenya.	2017
160	Wood, S.L.R. et al. 2016. Intensification of tropical fallow-based agriculture: Trading-off ecosystem services for economic gain in shifting cultivation landscapes?	2016
Id	Jornal	País
2	FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT	Brasil
3	SOIL BIOLOGY & BIOCHEMISTRY	Panamá
6	MITIGATION AND ADAPTATION STRATEGIES FOR GLOBAL CHANGE	Peru
11	LAND DEGRADATION AND DEVELOPMENT	Colômbia
22	J INSECT CONSERV	Costa do Marfim
23	MICROBIAL ECOLOGY	Brasil
28	ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT	Brasil
31	LAND DEGRADATION AND DEVELOPMENT	Brasil
33	RESTORATION ECOLOGY	Colômbia

35	JOURNAL OF INSECT CONSERVATION	Costa do Marfim
39	JOURNAL OF ADVANCES IN MODELING EARTH SYSTEMS	Indonésia
44	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	Porto Rico, Quênia
48	PLOS ONE	Bornéu da Malásia
52	GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE-HUMAN AND POLICY DIMENSIONS	seis regiões; nenhum país foi definido
53	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	Brasil
56	RANGELAND JOURNAL	Austrália
60	ECOLOGY AND SOCIETY	México
61	ECOLOGICAL INDICATORS	Colômbia
65	APPLIED SOIL ECOLOGY	Brasil, Colômbia
68	PLOS ONE	Global
78	LAND USE POLICY	NA
81	ECOLOGICAL ECONOMICS	NA
84	BIOTROPICA	Peru
88	ECOLOGICAL MODELLING	Brasil
90	ECOLOGICAL INDICATORS	Nicarágua
92	APPLIED SOIL ECOLOGY	Colômbia
96	LAND	Colômbia
99	PLOS ONE	Nicarágua
103	FRONTIERS IN PLANT SCIENCE	Indonésia
105	AGRICULTURE, ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT	México
108	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	China
109	ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS	Ilha Salomão
120	PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA	China
121	REVISTA DE BIOLOGÍA TROPICAL	Venezuela
122	GOT, REVISTA DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO	Brasil
127	HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL	México
135	WETLANDS	Tailândia
148	GLOBAL CHANGE BIOLOGY	México
151	SCIENCE	Global

157	BIOTROPICA	Quênia
160	AGRICULTURE, ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT	Peru
Id	Coordenadas (N/S)	Coordenadas (L/O)
2	06°59'13" - 07°00'40" (calibration and simulation); 06°35'35" S (validation)	37°18'08" - 37°20'38" (calibration and simulation); 37°14'19" W(validation)
3	9°06'	79°54'
6	Quistococha - 03° 49.886'; Las Brisas - 03°50.430'; San Julian 03°48.542' ; Llanque - 04°09.800; Monteverde - 04°10.075'; Avispa - 04°11.184'; Chanchari - 04°00.353'; Nueva York - 04° 21.130'; Pobre Cocha - 04°50.399'; San Martin - 04° 45.462'; Shiringal - 04°45.282'; San Miguel - 04°41.850' S	Quistococha - 73° 18.797'; Las Brisas - 73°19.549'; San Julian - 73°18.349' ; Llanque - 74°26.278; Monteverde - 74°25.182'; Avispa - 74°21.645'; Chanchari - 74°22.138'; Nueva York - 74° 17.598'; Pobre Cocha - 74°17.085'; San Martin - 74° 25.301'; Shiringal - 74°20.756'; San Miguel - 04°11.483' W
11	11°03'N	72°43'W
22	9°34'	5°37'
23	Rnnortheast - (1) 6°14'38.05" – 6° 14'42.83"; (2) 6°14'37.67" - 6° 14'43.34"; Rjsoutheast - (3) 23°2'52.20" – 23° 2'52.55" (4) 23°2'52.20" - 23° 2'52.64"; Scsout - (5) 28°57'23.39" - S– 28° 57'19.09"; (6) 28°57'23.39" - 28° 57'19.09"; FNnortheast - (7) 3°50'43.62"–3° 50'41.51"; (8) 3°50'30.85"–3° 50'28.87" ; IGsoutheast - (9) 23°10'4.89" – 23° 10'7.03"; (10) 23°10'7.03" – 23° 10'5.47"; FLsout - (11) 27°43'43.02" – 27° 43'58.88"; (12) 27°43'43.02" –27° 43'57.30" S.	Rnnortheast - (1) 35° 2'14.37"– 35° 2'15.19" W; (2) 35° 2'14.67"– 35° 2'15.21"; Rjsoutheast - (3) 43°31'2.08" – 43° 31'8.82" ; (4) 43° 31'4.63" – 43° 31'10.49"; Scsouth - (5) 49° 22'39.66" – 49° 22'34.58"; (6) 49° 22'39.66" – 49° 22'34.58"; Fnnortheast - (7) 32° 25'39.79" – 32° 25'35.56"; (8) 32° 25'2.46" – 32° 24'58.03"; IGsoutheast - (9) 44° 7'59.28" – 44° 7'54.31"; (10) 44° 7'54.31" – 44° 7'57.24" ; FLsouth - (11) 48° 30'25.33" – 48° 30'28.22"; (12) 48° 30'25.33" – 48° 30'27.82".
28	20° 42'; 20°19' - 20° 37' S	42° 26' ; 41° 43' - 41°53' W
31	23°9' S	46°20' W
33	11° 5' 22" N	72° 40' 31" W
35	6° 13' N	5° 02' W
39	Jambi Province, Sumatra - 01°41.6'S; Harapan, Jambi, Sumatra - 02°9.5'S; Bariri, Central Sulawesi - 01°39'S	Jambi Province, Sumatra - 103°23.5'E; Harapan, Jambi, Sumatra - 103°20'E; Central Sulawesi - 120°10'E
44	Puerto Rico - 8° 13' 48" N; Kenya - 2° 35' 56.42" S	Puerto Rico - 66° 0' 0" W; Kenya - 40° 20' 19.04" E
48	4° 58' N	117°48' E

52	NA	NA
53	13° 0' S	56° 0' W
56	14°0'0"S	131° 0' 0" E
60	19°31'47.99" N	105°04'24.00" W
61	5° 39' 21.96" N	75° 52' 43.57" W
65	1° 36' 50" N / 3.9° N	75° 36' 46" W / 53° O
68	NA	NA
78	NA	NA
81	NA	NA
84	Tambopata - 12°49'48" S; Wayqecha - 13°11'24" S	Tambopata - 69°16'48" W ; Wayqecha - 71°35'13" W
88	2.30° S	54.8° W
90	13°09'09" N	86°51'32" W
92	4° 20' N	72° 30' E
96	11° N	74° 47' W
99	12°21'N	83°40'W
103	01.95° S	103.25° E
105	19° 23'–19° 30' N	104° 56' –105° 04' W
108	19°4' N	109°31' E
109	7.988946° S	157.072° E
120	18°10'N to 21°10'N	108°37'E to 110°03'E
121	10°24' N	66°53' W
122	5° 07' 29" S	35° 38' 21" W
127	20°18'49"N	96°55'22" W
135	16° 12' 36" N	103° 37' 12" E
148	19° 20' N,	96° 50' W
151	NA	NA
157	NA	NA
160	NA	NA
Id	SE do solo abordado. Definição: SE do solo pode ser entendidos como fluxos de estoques de capital natural do solo benéficos para os seres humanos	Classificação
2	Sem informação	NA
3	Sem informação	NA
6	Estoque de C	Regulação
11	Sequestro de C	Regulação
22	Sem informação	NA
23	Sem informação	NA
28	Sequestro de C	Regulação
31	Filtragem da água	Regulação
33	Sem informação	NA
35	Sem informação	NA
39	produtividade de óleo de palma, filtragem de água	Regulação e provisão
44	Sem informação	NA

48	Sem informação	NA	
52	Estoque de C	Regulação	
53	Purificação de água e regulação do clima	Regulação	
56	Comida	Provisão	
60	Produtos agrícolas e pastoris, controle de enchentes	disposição, regulamentação e cultura	
61	Sem informação	NA	
65	Estoque de C	Regulação	
68	Sequestro de C	Regulação	
78	matéria-prima, reciclagem de resíduos e regulação do clima	Regulação e provisão	
81	matéria-prima, reciclagem de resíduos e regulação do clima	Regulação e provisão	
84	Sem informação	NA	
88	Sem informação	NA	
90	Sem informação	NA	
92	Sem informação	NA	
96	Sem informação	NA	
99	Sem informação	NA	
103	Controle biológico de pragas	Regulação	
105	Estoque de C, fornecimento de forragem	Regulação e provisão	
108	Produtividade	Provisão	
109	Fornecimento de água potável	NA	
120	Fornecimento de borracha, mitigação de inundações	Regulação e provisão	
121	Estoque de C	Regulação	
122	Sem informação	NA	
127	Mitigação de inundações e estoque de C	Regulação	
135	Estoque de C	Regulação	
148	Abastecimento de água e mitigação de inundações	Regulação	
151	Estoque de C e fornecimento de água potável	Regulação e provisão	
157	Sem informação	NA	
160	Comida, madeira	Provisão	
Id	Denominado como SE do solo, mas é processo do solo, propriedade do solo ou função do solo	Fizeram avaliação?	Tipo de avaliação
2	Conservação do solo	Não	NA
3	Regulação de processos hidrológicos, ciclagem e decomposição de nutrientes e estrutura do solo	Não	NA

6	Sem informação	Não	NA
11	Fertilidade do solo	Não	NA
22	Sem informação	Não	NA
23	Sem informação	Não	NA
28	Controle de erosão e estrutura do solo	Não	NA
31	Manutenção da fertilidade, controle de sedimentos	Não	NA
33	Ciclagem de nutrientes	Não	NA
35	Decomposição e ciclagem de nutrientes	Não	NA
39	Sem informação	Não	NA
44	Exportação de sedimentos	Não	NA
48	Decomposição e reciclagem de nutrientes	Não	NA
52	Sem informação	Não	NA
53	Resistência à erosão, produção biótica	Sim	Monetária
56	NA	Não	NA
60	Mantendo a fertilidade	Não	NA
61	Controle de erosão	Não	NA
65	Infiltração de água; água do solo disponível para as plantas; macroporosidade; matéria orgânica do solo; e qualidade física do solo, agregação e fertilidade	Não	NA
68	Proteção do solo	Não	NA
78	Abastecimento de água para a vegetação, ciclagem biogeoquímica, retenção de nutrientes, transporte de elementos, conservação da biodiversidade, habitat para organismos	Não	NA
81	Ciclagem de nutrientes, controle de erosão	Não	NA
84	Ciclagem de C e N, decomposição	Não	NA
88	Ciclagem de nutrientes, controle de erosão	Sim	Monetário
90	NA	Não	NA
92	Fornecimento de nutrientes, armazenamento e regulação da água, manutenção da estrutura do solo, regulação do clima do solo e da biodiversidade e atividade biológica.	Não	NA
96	NA	Não	NA
99	NA	Não	NA

103	Decomposição da serapilheira, fertilidade do solo	Não	NA
105	Fertilidade do solo, estrutura do solo, manutenção da biodiversidade	Não	NA
108	Fertilidade do solo	Não	NA
109	Fertilidade do solo	Não	NA
120	Retenção do solo, retenção de nutrientes	Sim	Monetário
121	Fornecimento de nutrientes	Não	NA
122	Filtração biológica e desintoxicação bioquímica	Não	NA
127	NA	Não	NA
135	NA	Não	NA
148	NA	Não	NA
151	Fertilidade do solo	Não	NA
157	NA	Não	NA
160	Fertilidade do solo, acúmulo de biomassa lenhosa	Não	NA

Apêndice 2 – Datas das visitas e respectivos meses de experimento

Datas das visitas	Meses do experimento
10/11/2016	1 mês
16/01/2017	3 meses
15/03/2017	5 meses
19/04/2017	6 meses
18/07/2017	9 meses
25/09/2017	11 meses
16/11/2017	13 meses
02/02/2018	16 meses
24/04/2018	18 meses
04/07/2018	21 meses
28/08/2018	23 meses
13/11/2018	24 meses
27/02/2019	28 meses
22/07/2020	33 meses
11/01/2021	39 meses

Apêndice 3 – Total de mudas vivas, % de mudas vivas e % de mudas mortas ao longo do tempo do experimento

Tempo	total de mudas vivas	% de mudas vivas	% de mudas mortas
início	245	0,0%	0,0%
1 mês	238	97,1%	2,9%
3 meses	205	83,7%	16,3%
5 meses	184	75,1%	24,9%
6 meses	184	75,1%	24,9%
9 meses	175	71,4%	28,6%
11 meses	170	69,4%	30,6%
13 meses	153	62,4%	37,6%
16 meses	143	58,4%	41,6%
18 meses	134	54,7%	45,3%
21 meses	126	51,4%	48,6%
23 meses	124	50,6%	49,4%
24 meses	119	48,6%	51,4%
28 meses	48	19,6%	80,4%
33 meses	33	13,5%	86,5%
39 meses	33	13,5%	86,5%

Apêndice 4 – Valores de COS (g/kg) e valores de argila (g/kg) utilizados para estimar a densidade (g/cm³) das amostras de solo pela função de predição desenvolvida por Benites et al. 2006. A densidade do tempo 0 não foi estimada pois não houve análise de granulometria para esse tempo. Esse fator não prejudica a análise visto que a granulometria do solo dificilmente muda com o uso

Blocos	Tempo	COS (g/kg)	Argila (g/kg)	DS (g/cm³)
Bloco 1	1	2,90	300	1,39
Bloco 1	1	5,63	260	1,39
Bloco 1	1	2,90	280	1,40
Bloco 1	1	4,06	260	1,40
Bloco 1	1	3,83	260	1,40
Bloco 2	1	2,15	340	1,38
Bloco 2	1	2,03	420	1,34
Bloco 2	1	3,02	320	1,38
Bloco 2	1	2,03	320	1,39
Bloco 2	1	2,20	160	1,47
Bloco 3	1	1,51	400	1,36
Bloco 3	1	2,26	360	1,37
Bloco 3	1	1,68	310	1,40
Bloco 3	1	2,09	380	1,36
Bloco 3	1	3,60	300	1,39
Bloco 4	1	1,80	320	1,39

Bloco 4	1	1,57	370	1,37
Bloco 4	1	1,68	380	1,36
Bloco 4	1	3,07	410	1,34
Bloco 4	1	2,26	400	1,35
Bloco 5	1	1,86	340	1,38
Bloco 5	1	1,86	400	1,35
Bloco 5	1	4,70	250	1,40
Bloco 5	1	7,54	430	1,29
Bloco 5	1	2,20	440	1,33
Média				1,38
Bloco 1	2	10,50	250	1,35
Bloco 1	2	6,67	350	1,33
Bloco 1	2	2,78	310	1,39
Bloco 1	2	3,02	330	1,38
Bloco 1	2	7,42	270	1,37
Bloco 2	2	6,38	310	1,36
Bloco 2	2	3,36	330	1,37
Bloco 2	2	2,61	370	1,36
Bloco 2	2	2,67	370	1,36
Bloco 2	2	3,65	310	1,38
Bloco 3	2	7,89	310	1,34
Bloco 3	2	5,57	310	1,36
Bloco 3	2	2,67	320	1,38
Bloco 3	2	4,93	350	1,35
Bloco 3	2	4,81	350	1,35
Bloco 4	2	6,03	390	1,32
Bloco 4	2	6,32	430	1,30
Bloco 4	2	4,23	370	1,35
Bloco 4	2	2,67	330	1,38
Bloco 4	2	2,32	370	1,36
Bloco 5	2	8,70	370	1,31
Bloco 5	2	11,43	370	1,28
Bloco 5	2	10,27	280	1,34
Bloco 5	2	3,42	260	1,41
Bloco 5	2	2,26	320	1,39
Média				1,36

Apêndice 5 – Valor do COS obtido pela diferença entre o T0 e T2, conversão desse valor de COS para CO_{2eq} (fator 3,67)

Tempos	COS (t)	CO_{2eq}
Tempo 0	0,84	3,07
Tempo 1	1,11	4,08
Tempo 2	2,09	7,68
Tempo 2 -0	1,25	4,61

A**Artigo da Tese Publicado em Periódico**

O capítulo 2 desta tese, intitulado “Revisão sistemática dos serviços ecossistêmicos do solo em regiões tropicais”, foi publicado no periódico *Royal Society Open Science* em março de 2021. A referência completa é: Rodrigues AF et al. 2021 Systematic review of soil ecosystem services in tropical regions. R. Soc. Open Sci. 8: 201584. <https://doi.org/10.1098/rsos.201584>