

Oportunidades e desafios relacionados aos serviços ecossistêmicos de solo e água na paisagem rural

Rachel Bardy Prado¹
Elaine Cristina Cardoso Fidalgo²
Lucília Maria Parron³
Ana Paula Dias Tureta⁴
Fabiano de Carvalho Balieiro⁵

RESUMO

Os serviços ecossistêmicos relacionados ao solo e à água se destacam nas paisagens rurais, principalmente no que tange à produção agropecuária. Por meio das relações solo-água é que muitos serviços ecossistêmicos são gerados e relacionados aos processos de infiltração e recarga de aquíferos, escoamento superficial da água no solo, transferência de água para as plantas, provisão de alimentos, evapotranspiração, manutenção da umidade e biodiversidade dos solos, ciclagem e transporte de nutrientes, estoque de carbono e outros. O presente estudo realizou um levantamento na literatura, focando em metodologias para a avaliação de serviços ecossistêmicos de solo e água, na multifuncionalidade da paisagem rural e na diversidade dos serviços ecossistêmicos gerados, em políticas públicas correlatas e nas oportunidades e nos desafios relacionados à sua gestão. Também foram apresentados dois estudos de caso, desenvolvidos pelos autores, em que se realizou avaliação de serviços ecossistêmicos de solo e água em diferentes agroecossistemas na região sul (Paraná) e central (Rio de Janeiro) do bioma Mata Atlântica. Concluiu-se que, no Brasil, os métodos de avaliação e valoração dos serviços ecossistêmicos do solo e da água ainda precisam ser aprimorados e validados em diferentes escalas e que é preciso valorizar o papel dos produtores rurais para a conservação e manejo adequado dos serviços ecossistêmicos em agroecossistemas e na paisagem rural.

Termos para indexação: agroecossistemas, multifuncionalidade, políticas públicas, serviços ambientais.

Opportunities and challenges related to soil and water ecosystem services in the rural landscape

ABSTRACT

Ecosystem services related to soil and water stand out in rural landscapes, especially regarding agricultural production. Through soil-water relationships, many ecosystem services are generated and related to the processes of infiltration and recharge of aquifers,

¹ Bióloga, doutora em Ciências da Engenharia Ambiental, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: rachel.prado@embrapa.br

² Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: elaine.fidalgo@embrapa.br

³ Bióloga, doutora em Ecologia de Ecossistemas, pós-doutorado no departamento Land Economy & Environment, Scotland's Rural College (SRUC), UK, pesquisadora da Embrapa Florestas, Colombo, PR. E-mail: lucilia.parron@embrapa.br

⁴ Geógrafa, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: ana.tureta@embrapa.br

⁵ Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: fabiano.balieiro@embrapa.br

Ideias centrais

- A multifuncionalidade da paisagem rural é resultado do manejo sustentável e reflete diretamente na provisão dos serviços ecossistêmicos de solo e água.
- Os agroecossistemas podem fornecer uma série de serviços ecossistêmicos que vão além da provisão de alimentos e fibras.
- Estudos de caso de avaliação de serviços ecossistêmicos de solo e água no Brasil, trazem grande contribuição para o avanço do conhecimento.
- A avaliação dos impactos de políticas públicas permite atrair novos investidores e parceiros nos processos de compensação e no redirecionamento de ações.

Recebido em
07/09/2021

Aprovado em
08/06/2022

Publicado em
27/09/2022



This article is published in Open Access under the Creative Commons Attribution licence, which allows use, distribution, and reproduction in any medium, without restrictions, as long as the original work is correctly cited.

surface runoff of water in the soil, transfer of water to plants, provision of food, evapotranspiration, maintenance of moisture and biodiversity of soils, cycling and transport of nutrients, carbon storage and others. This study carried out a survey of the literature focusing on methodologies for the assessment of soil and water ecosystem services, the multifunctionality of the rural landscape and the diversity of ecosystem services generated, related public policies, and opportunities and challenges related to their management. Two case studies developed by the authors were also presented, where the assessment of soil and water ecosystem services occurred in different agroecosystems in the southern (state of Paraná, Brazil) and central (state of Rio de Janeiro, Brazil) regions of the Atlantic Forest biome. It was concluded that in Brazil, the methods of assessment and valuation of soil and water ecosystem services still need to be improved and validated at different scales and that the role of rural producers must be valued for the conservation and proper management of ecosystem services in agroecosystems and in rural landscape.

Index terms: agroecosystems, multifunctionality, public policies, environmental services.

INTRODUÇÃO

A sociedade tem demonstrado crescente preocupação com as consequências das mudanças do ambiente sobre a qualidade de vida e o bem-estar humano. Uma importante iniciativa nesse contexto foi a Avaliação Ecosistêmica do Milênio (Millennium Ecosystem Assessment, 2003), que reuniu mais de 2 mil técnicos e pesquisadores de todo o mundo para avaliar as consequências dessas mudanças, bem como as bases científicas das ações necessárias para a preservação dos ecossistemas e seu uso sustentável.

Daily et al. (1997) foi um dos primeiros autores a definir serviços ecossistêmicos como “os serviços prestados pelos ecossistemas naturais e as espécies que os compõem, na sustentação e preenchimento das condições de permanência da vida humana na Terra” (p.2, tradução nossa). Um conceito muito similar a esse foi apresentado pelo Millennium Ecosystem Assessment (2003), sendo o mais utilizado atualmente, de serviços ecossistêmicos (SE) como “os benefícios que o ser humano obtém dos ecossistemas” (p.78, tradução nossa).

Destaca-se, entre os SE, a importância dos relacionados ao solo e à água quando se fala de agroecossistemas e paisagens rurais. Por meio das relações solo-água, muitos serviços ecossistêmicos são gerados e relacionados aos processos de infiltração e recarga de aquíferos, escoamento superficial da água no solo, transferência de água para as plantas, provisão de alimentos, evapotranspiração, manutenção da umidade e biodiversidade dos solos, ciclagem e transporte de nutrientes, estoque de carbono e outros.

Estima-se uma perda entre 84% e 88% da biodiversidade do planeta até 2050 (McNeill & McNeill, 2003; Williams et al., 2021). Acredita-se que a conversão de áreas naturais para terras agrícolas, a expansão contínua da infraestrutura e os efeitos crescentes das mudanças climáticas (IPCC, 2021) serão os principais fatores contribuintes para essa perda de biodiversidade. Ao longo do período de 2000 a 2050, espera-se perda das áreas naturais do planeta de em torno de 750 milhões de hectares, equivalentes ao tamanho da Austrália (McNeill & McNeill, 2003).

No Brasil, segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA), estima-se a perda de ambientes naturais entre 15% e 18% no bioma Amazônia; 50% nos biomas Cerrado, Pampas e Caatinga; e 88% no bioma Mata Atlântica (Ferreira et al., 2012). Sparovek et al. (2010) estimaram um passivo ambiental de 21 a 30 milhões de hectares a serem restaurados no Brasil. Esse processo de degradação é resultado da dinâmica de uso e cobertura das terras que tem causado o desmatamento de Áreas de Preservação Permanente (principalmente nascentes e matas ciliares), a ocupação de áreas inaptas à agricultura (com solos frágeis e elevada declividade), a construção inadequada de estradas, o manejo das terras sem os cuidados conservacionistas (aração morro abaixo, desagregação dos solos, sobre-pastoreio, entre outros) e a poluição das águas (Lapola et al., 2014; Prado et al., 2017). Em algumas regiões do País, porém, o abandono da atividade pecuária e o estabelecimento de empreendimentos florestais têm levado ao aumento da cobertura florestal nativa, fenômeno esse chamado de *transição florestal* (Silva et al., 2016; Rezende et al., 2018).

Além das perdas na biodiversidade, pode-se mencionar a degradação das terras e da água, como consequência de diversas pressões antrópicas, com reflexos diretos e indiretos na provisão dos SE. As pastagens mal manejadas no Brasil são responsáveis por processos de perda de solos por erosão, causando sua degradação (Ferreira et al., 2014; Guerra et al., 2014). As perdas anuais de solo em áreas ocupadas por lavouras e pastagens ultrapassam 500 milhões de toneladas, ocasionando custos adicionais nas propriedades rurais e prejuízos econômicos e ambientais para o País (Bertoni & Lombardi Neto, 2012). Grande parte do solo perdido pela erosão chega aos rios, assoreando-os e reduzindo sua vazão, como é o caso da bacia do rio Paraíba do Sul e do rio São Francisco, essenciais ao abastecimento de água para grande parte da população brasileira (Prado et al., 2017). Essa bacia possui mais de 50% da área total nas classes de alta e muito alta vulnerabilidade à erosão, e por estar a jusante dos trechos paulista e mineiro, acumula os efeitos negativos da erosão que ocorre a montante (Fundação Coppetec, 2006).

Considerando que o Brasil já é um dos maiores produtores de commodities do mundo (OECD/FAO..., 2021), para alcançar a liderança na produção agropecuária nas próximas décadas, é essencial o manejo conservacionista dos solos e da água no meio rural para assegurar a provisão contínua dos SE, fundamentais à produção agropecuária. O desafio é conciliar o aumento da produção agropecuária com a conservação e valorização do capital natural e social na paisagem rural.

Assim, é preciso avaliar (quantificar) e valorar os impactos de sistemas de produção agropecuária no Brasil, incluindo o Sistema Plantio Direto (SPD), os sistemas integrados, como Integração Lavoura-Pecuária (ILP), Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), sistemas agroflorestais e agroecológicos, na provisão e manutenção dos SE relacionados ao solo e à água na paisagem rural, bem como seu potencial de agregação de valor e contribuição para a melhoria da qualidade de vida da sociedade. Sobretudo, é preciso avançar na proposição de métodos e tecnologias capazes de certificar a produção agropecuária com foco na provisão de SE.

O presente estudo apresenta o estado da arte da avaliação de serviços ecossistêmicos de solo e água na paisagem rural, com foco nos agroecossistemas, olhando também para a multifuncionalidade da paisagem e a diversidade dos serviços ecossistêmicos gerados, para as políticas públicas correlatas e para as oportunidades e desafios relacionados à sua gestão. Dois estudos de caso de avaliação de serviços ecossistêmicos de solo e água em agroecossistemas no bioma Mata Atlântica (Paraná e Rio de Janeiro) ilustram o debate e a discussão do tema.

Abordagem da avaliação de serviços ecossistêmicos na paisagem rural, com destaque para solo e água

O Millennium Ecosystem Assessment (2003) classifica os SE em quatro categorias: provisão, regulação, suporte e culturais. Essa abordagem leva em conta algumas premissas, a saber: é multiescalar (requer diferentes escalas de atuação, desde a propriedade até a paisagem rural); apresenta visão sistêmica e interdisciplinar; valoriza os serviços ecossistêmicos ao relacioná-los ao bem-estar humano; internaliza o valor econômico dos serviços ecossistêmicos nos processos produtivos; e aproxima ciência e tomadores de decisão.

Para Nicholson et al. (2009), a importância de estudar os serviços ecossistêmicos tem sido amplamente reconhecida, e progressos rápidos têm ocorrido em relação a isso. Entretanto, prevalece ainda uma abordagem estática, baseada na avaliação independente de cada serviço ecossistêmico, ignorando o fato de que os ecossistemas são dinâmicos e requerem uma abordagem interdisciplinar.

A formulação e aplicação de metodologias para mensurar e avaliar os serviços ecossistêmicos permite balizar as decisões de agricultores, gestores, empresários e outros usuários diretos de recursos naturais. Por outro lado, tais estudos também auxiliam no desenvolvimento e no uso de instrumentos político-econômicos que permitam identificar e incentivar atores e práticas de manejo de recursos naturais, em prol da conservação de serviços ecossistêmicos (Turetta et al., 2010).

A escolha de indicadores é uma etapa importante nas metodologias de avaliação de SE. Indicadores ambientais são informações selecionadas que representam ou resumem alguns aspectos do

estado do meio ambiente, dos recursos naturais e de atividades humanas relacionadas, sendo muito importante que se tenha claro o objetivo da avaliação e do monitoramento dos serviços ecossistêmicos antes de defini-los. Alguns critérios são empregados na seleção dos indicadores, como relevância, viabilidade, clareza e sensibilidade (Fidalgo et al., 2017).

No caso da avaliação de SE, os indicadores são empregados para medir as alterações em sua provisão (ou variações dos estoques do Capital Natural), por meio de uma intervenção que pode ser um manejo conservacionista do solo ou água ou uma restauração florestal, e não apenas avaliar as respostas por um componente ambiental como o solo, a água ou a biodiversidade (Dominati et al., 2014; Janes Basset & Davies, 2018). Percebe-se uma evolução em relação à aplicação de indicadores para avaliar os componentes solo e água (por exemplo, qualidade) capazes de avaliar os SE prestados, de acordo com as práticas de manejo conservacionistas adotadas (Dominati et al., 2010). Dessa forma, a cada estudo em diferentes partes do mundo, são desenvolvidos ou aprimorados indicadores e métodos capazes de avaliar diferentes SE em agroecossistemas.

A Tabela 1 compila alguns indicadores, com base na experiência dos autores, que podem ser aplicados na avaliação dos impactos de ações conservacionistas e de restauração florestal nos SE na paisagem rural, com destaque ao solo e à água.

Tabela 1. Classificação dos SE e seus indicadores relacionados ao solo e à água na paisagem rural.

Classe de serviços ecossistêmicos	Serviços ecossistêmicos	Indicadores
Provisão e regulação	Provisão de água	Vazão, precipitação
Regulação	Purificação da água	pH, condutividade elétrica, turbidez
Regulação	Controle da erosão	Perda de solo estimada por área, ocorrência de erosão (número de pontos de erosão ou de solo exposto, por área), turbidez da água de escoamento
Regulação	Controle da inundação	Taxa de escoamento superficial, infiltração de água no solo
Regulação	Infiltração de água no solo	Taxa de infiltração de água no solo, agregados de solo
Regulação	Estoque de carbono	Teor de MOS ⁽¹⁾ e deste associado à densidade do solo
Regulação	Fertilidade do solo	Teor de micro e macronutrientes, teor de MOS
Suporte	Manutenção da biodiversidade	Presença de insetos, micro e macroinvertebrados, plântulas, porcentagem de cobertura vegetal
Provisão	Provisão de alimentos	Produção de alimentos, incremento de renda do produtor
Culturais	Beleza cênica	Porcentagem de cobertura vegetal, presença de aves, agroecoturismo, visitantes em unidades de conservação

⁽¹⁾MOS: matéria orgânica no solo.

Quando se pretende avaliar a distribuição espacial dos serviços ecossistêmicos na paisagem rural, as geotecnologias podem auxiliar em seu mapeamento e na geração de cenários futuros. Por meio delas, é possível fazer a interpretação de imagens de satélite que permitem acompanhar a dinâmica do uso e cobertura da terra e analisar sua fragmentação, além de permitir a sobreposição e ponderação de mapas para identificar áreas críticas e prioritárias à recuperação/conservação/proteção de serviços ecossistêmicos na paisagem rural. Os mapas resultantes da aplicação de geotecnologias podem ser construídos por meio da seleção e espacialização de indicadores dos serviços ecossistêmicos, do desenvolvimento de modelos biofísicos ou, ainda, de abordagens participativas de mapeamento (Burgess et al., 2016).

O mapeamento dos serviços ecossistêmicos permite ao usuário visualizar os dados; identificar padrões espaciais, sobreposições, sinergias e lacunas; explorar mudanças ao longo do tempo; construir cenários e observar o potencial de impactos futuros em face das mudanças; e, sobretudo, facilita a discussão e a tomada de decisão (Burgess et al., 2016). Burkhard & Maes (2017) apresentam uma série de metodologias para o mapeamento de serviços ecossistêmicos que podem ser consultadas e aplicadas em diferentes contextos e escalas.

Evolução também tem sido observada na modelagem de processos dinâmicos do solo relacionados aos diversos serviços ecossistêmicos. Um exemplo é o SPASMO (Soil Plant Atmosphere System Model) (Green et al., 2003), que foi concebido para fazendas com atividade pecuária e é sensível às práticas de manejo adotadas sobre o crescimento das plantas, as propriedades do solo e a regulação dos serviços prestados pelo solo (Dominati et al., 2014). Outros exemplos de ferramentas e modelos usados na avaliação de serviços ecossistêmicos do solo existem (por exemplo, TESSA, InVest, ARIES e MIMES) e foram descritos brevemente por Prado et al. (2016).

Prado et al. (2016) fizeram um levantamento do estado da arte global dos estudos de SE de solos e seu potencial de aplicação no Brasil. A revisão mostrou a necessidade de avanços na ciência do solo para um melhor conhecimento sobre os efeitos do uso e manejo da terra nos SE. Para que a abordagem de SE do solo seja mais efetiva na sociedade, ela deve ir além das ações de cientistas e gestores, devendo contribuir para a melhoria da governança do solo, o que requer interdisciplinaridade e participação de todos os setores da sociedade.

O papel da agropecuária na provisão de serviços ecossistêmicos na paisagem rural

A agropecuária fornece e recebe serviços ecossistêmicos que se estendem muito além da provisão de alimentos, fibras e combustível, sendo muitos realizados de forma indireta, e, portanto, subestimados. Nesses casos, somente em sua ausência, eles se tornam perceptíveis (Swinton et al., 2007). Os serviços ecossistêmicos dos agroecossistemas, advindos da produção de alimentos, fibras e combustíveis, são classificados como serviços de provisão pela Avaliação Ecossistêmica do Milênio (Millennium Ecosystem Assessment, 2003), porém, dependem de uma rede de serviços de suporte e de regulação como insumos para a produção, incluindo polinização, controle de pragas, diversidade genética para uso agropecuário futuro, retenção de água no solo, regulação da fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes (Swinton et al., 2007; Zhang et al., 2007; Power, 2010; Cong et al., 2016).

Os agroecossistemas podem fornecer uma série de outros serviços de regulação e culturais, além de serviços de provisão e serviços de suporte. Os serviços de regulação dos agroecossistemas podem incluir controle de inundações, controle de qualidade da água, armazenamento de carbono e regulação do clima, por meio de emissões de gases de efeito estufa, regulação de doenças e tratamento de resíduos (por exemplo, nutrientes e pesticidas). Os serviços culturais podem incluir beleza cênica, educação, recreação e turismo. A conservação da biodiversidade também pode ser considerada um serviço ecossistêmico cultural influenciado pela agropecuária, uma vez que a maioria dos povos reconhece a valorização da natureza como um valor humano explícito (Swinton et al., 2007; Power, 2010).

Garbach et al. (2014) destacam que a avaliação e o manejo dos serviços ecossistêmicos em paisagens rurais com a presença de agroecossistemas aparecem no topo de prioridades por diversas razões. Primeiro, os agroecossistemas estão entre os ambientes mais extensos da superfície terrestre. Segundo, o aumento da produção de alimentos e fibras tem sido alcançado à custa da degradação de outros serviços ecossistêmicos.

A prestação de serviços ecossistêmicos à agropecuária é altamente dependente da estrutura da paisagem em que o agroecossistema está embutido. Campos agrícolas dependem de serviços prestados por ecossistemas próximos, e os ecossistemas são frequentemente influenciados por seus vizinhos agrícolas. As paisagens rurais com a presença de agroecossistemas variam de um contínuo de paisagens estruturalmente simples, dominadas por um ou dois sistemas de cultivo, para mosaicos complexos de diversos sistemas de cultivo e pastagem. Os ecossistemas vizinhos podem fornecer comida, refúgio e local para reprodução de polinizadores e agentes de controle biológico (Swinton et al., 2007; Power, 2010; Cong et al., 2016). No caso do fornecimento de água aos agroecossistemas, este depende dos padrões de fluxo em toda a paisagem rural e pode ser influenciado por uma variedade de fatores biofísicos. O fluxo de água é influenciado por retiradas para irrigação ou abastecimento, bem como pela simplificação da paisagem (usos intensivos e homogêneos).

Muito tem sido discutido sobre o papel de práticas conservacionistas na agropecuária para a provisão dos serviços ecossistêmicos (Asbjørn et al., 2014; DeClerck et al., 2016; Landis 2017). As relações entre práticas agropecuárias, processos ecológicos e serviços ecossistêmicos têm forte dependência das características locais específicas (Duru et al., 2015) e há evidências de melhorias em alguns serviços ecossistêmicos quando se pratica a agricultura conservacionista. Por exemplo, o aumento da matéria orgânica da superfície do solo resultante de práticas conservacionistas melhora as propriedades e processos do solo, que reduzem a erosão e o escoamento superficial de água e contribuem para a melhoria da qualidade da água (Freitas & Landers, 2014; Palm et al., 2014).

Nas duas últimas décadas, trabalhar na interface entre ecologia e economia para caracterizar, valorar e gerenciar os serviços dos ecossistemas tem conduzido a uma mudança de paradigma na forma como a sociedade pensa nos ecossistemas e na sua relação com o homem (Garbach et al., 2014). As paisagens rurais e as pessoas dentro delas, como principais fornecedores e beneficiários dos serviços ecossistêmicos, estão no centro dessa mudança. As crescentes demandas pelo manejo de paisagens rurais como sistemas “multifuncionais” geram novas diretrizes, bem como oportunidades para manter e melhorar os serviços ecossistêmicos como parte dos agroecossistemas produtivos.

Serviços ecossistêmicos múltiplos providos pelos agroecossistemas, com destaque aos relacionados ao solo e à água na paisagem rural

O termo “multifuncionalidade da agropecuária” tem sido utilizado com vários significados no debate sobre políticas agropecuárias, dependendo do país e do contexto em que surgiu (OECD, 2001). No Brasil, o uso dessa abordagem ainda é limitado, mas tem ganhado força quando se demonstra o potencial da agropecuária em prover SE, além de sua função primária de produtora de alimentos, fibra e energia. Esse conceito se traduz em uma abordagem de provisão de SE pelos agroecossistemas.

Quando se fala em multifuncionalidade, o solo consiste em um bom exemplo. Cada um dos SE do solo representa algo que o solo faz e que, com outros fatores não relacionados ao solo, confere algum benefício significativo ao homem (Braat & de Groot, 2012; Dominati et al., 2010; Hewitt et al., 2015). O serviço é derivado de uma função do solo, a qual, por sua vez, resulta de um processo ou conjunto de processos do sistema solo (Karlen et al., 1997; Hewitt et al., 2015). O conceito de “função” descreve uma combinação de estrutura e processos, mas também representa o potencial que os ecossistemas têm de fornecer um serviço (Braat & de Groot, 2012).

Os serviços do solo são derivados de sua função de suporte, como produção primária; manutenção e reserva de biodiversidade; formação e recuperação do solo; ciclagem de nutrientes e água; suporte para atividades e ocupação humanas (infraestrutura, moradia, indústria, etc.); serviços de regulação (controle biológico de doenças e pragas, reciclagem de resíduos, remediação de poluentes, filtragem da água, de nutrientes e contaminantes, armazenamento, retenção e fornecimento de água, controle de enchentes e secas, controle de erosão, controle de gases de efeito estufa, regulação do clima, etc.); serviços de provisão (biomassa, recursos genéticos, alimentos, medicamentos, fibras, energia, água, etc.); e serviços culturais (lazer, desenvolvimento de experiências e atividades cognitivas, estéticas, educacionais, espirituais e científicas, conservação do patrimônio histórico e cultural, etc.) (Barrios, 2007; Haygarth & Ritz, 2009; Dominati et al., 2010; Jónsson & Davíðsdóttir, 2016).

Nas últimas décadas, múltiplas funções e serviços ecossistêmicos do solo têm sido destacados pela ciência do solo, considerando-o um sistema complexo, intrinsecamente ligado à segurança humana, integridade ambiental e aspectos econômicos (Blum, 2005; Haygarth & Ritz, 2009; Robinson et al., 2014). Hewitt et al. (2015) destacam que, apesar do interesse crescente no papel do solo e do reconhecimento de suas funções para a provisão dos serviços ecossistêmicos, ele ainda é subavaliado e pouco destacado nas decisões políticas, e consideram que são necessárias técnicas para quantificar e mapear o capital natural do solo e seu potencial para fornecer serviços ecossistêmicos de forma a permitir uma efetiva confluência entre a comunidade científica do solo e os tomadores de decisão.

Nesse contexto, o capital natural do solo (CNS) emerge como um conceito útil para analisar problemas ambientais e de gestão de recursos naturais. O CNS pode ser considerado o estoque do solo

capaz de assegurar a prestação de SE requeridos por um uso específico da terra, no qual as práticas de manejo sustentável são assumidas (Hewitt et al., 2015). Ele precisa ser definido e quantificado para que possa ser uma ferramenta usada para orientar o desenvolvimento de políticas e gestão de recursos da terra em escalas locais e global (Robinson et al., 2012; McBratney et al., 2014).

Destaca-se ainda a importância do solo como um componente fundamental para assegurar a quantidade e a qualidade da água. Os serviços fornecidos pela água e solo dependem de processos em que ambos interagem. Dominati et al. (2010) apontam, como exemplo, que as propriedades físicas do solo influem no conteúdo e no movimento da água, que, por sua vez, influi nas propriedades químicas e biológicas do solo. Em retorno, as propriedades e os processos químicos e biológicos que envolvem colóides do solo influem nas propriedades físicas do solo. No caso da água, Brauman et al. (2007) destacam que os componentes do ciclo da água, como quantidade, qualidade, localização e fluxo, são diretamente influenciados pelos ecossistemas à medida que a água se move pela paisagem. Ao afetarem cada um desses componentes, os processos do ecossistema melhoram ou degradam o fornecimento de serviços ecossistêmicos hídricos.

Segundo Brauman et al. (2007), os serviços ecossistêmicos hídricos são aqueles decorrentes da existência e da dinâmica dos corpos hídricos e que propiciam benefícios diretos e indiretos, assim como recursos necessários às atividades e condições de vida e bem-estar humanos. Os autores organizam esses serviços ecossistêmicos hídricos em cinco categorias: abastecimento para uso consultivo humano, agropecuário, etc.; abastecimento para o uso não consultivo, como recreação, transporte e fornecimento de energia elétrica; suporte, fornecendo água e nutrientes vitais para estuários e preservação de outros habitats; mitigação de danos causados por inundações, salinização de terras áridas, sedimentação; e serviço cultural em face do uso espiritual, educacional e estético.

A dinâmica de uso e cobertura das terras altera os ecossistemas ao modificar sua estrutura e o funcionamento dos processos ecológicos que envolvem o solo e a água. É necessário estabelecer um balanço dos serviços ecossistêmicos fornecidos diante das demandas da sociedade e seus impactos para a sustentabilidade. Dominati et al. (2010), referindo-se ao solo, salientam que é fundamental considerar a degradação dos estoques de capital natural, e identificar e quantificar os processos que causam degradação, porque a perda de capital natural leva à perda de serviços ecossistêmicos. Os processos do solo são influenciados por muitos fatores mais ou menos externos ao sistema em que ocorrem. Esses fatores podem vir de origens naturais ou ser antropogênicos, influenciando os processos do solo de diferentes maneiras, incluindo sua natureza e velocidade. Fatores naturais que influenciam os processos do solo e os estoques de capital natural incluem o clima, os riscos naturais e a biodiversidade. Destaca-se, mais uma vez, que o manejo adequado e conservacionista do solo é essencial à sustentabilidade da agropecuária, uma vez que mantém os estoques do capital natural a ele associados (Powlson et al., 2011).

Avaliação de serviços ecossistêmicos, com destaque aos relacionados ao solo e à água na paisagem rural: da teoria à prática

Para facilitar a compreensão de como os SE relacionados ao solo e à água podem ser avaliados no meio rural, a seguir são apresentados resultados de dois estudos de caso desenvolvidos por pesquisadores da Embrapa e seus parceiros em diferentes regiões e contextos agroambientais no bioma Mata Atlântica: um desenvolvido nos Campos Gerais do Paraná, em Ponta Grossa, e outro na região serrana do estado do Rio de Janeiro.

Destaca-se que a Embrapa possui uma rede de pesquisa intitulada Serviços Ambientais, na qual diversos projetos estão associados e em andamento, desenvolvendo, adaptando e aplicando ferramentas para avaliação, monitoramento, modelagem, valoração e outros aspectos dos serviços ecossistêmicos, em diferentes biomas brasileiros.

Estudo de caso nos Campos Gerais do Paraná

Este estudo de avaliação biofísica de múltiplos serviços ecossistêmicos em diferentes usos da terra foi realizado nos Campos Gerais do Paraná, em Ponta Grossa, que é parte do ecossistema floresta ombrófila mista (FOM) do bioma Mata Atlântica. Nessa região, o clima é temperado úmido (grupo climático subtropical úmido – Cfa), caracterizado por temperaturas médias entre 13,9 °C e 21,4 °C, precipitação de 1.523 mm ano⁻¹ e evapotranspiração de 930 mm ano⁻¹ (IDR Paraná, 2022), com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. Em termos geológicos, a região apresenta litologia da Formação Furnas e Ponta Grossa (Rostirolla et al., 2007). Os locais de estudo se encontram na bacia hidrográfica do alto rio Tibagi, onde grande parte dos solos é formada por rochas sedimentares, como os folhelhos, com predominância de silte e argila, originando solos argilosos. O relevo suave-ondulado abriga uma grande extensão de solos profundos, bem estruturados, porosos e de boa drenagem (Santos et al., 2008). A vegetação original é composta por savana gramíneo-lenhosa e floresta ombrófila mista, constituída por campos naturais e capões de florestas de araucária (Cervi et al., 2007). O uso do solo na região até 1989 era composto de campos e agricultura cíclica (ITCG, 2009) e, atualmente, é de agricultura intensiva mecanizada.

Os usos da terra considerados no estudo compreendem sistemas agrossilvipastoris (integração lavoura-pecuária-floresta – ILPF), cultivo florestal de *Eucalyptus dunnii* (EP), cultivo agrícola em plantio direto (NT) e floresta natural (NF). Os sistemas agrossilvipastoris compreendem o consórcio entre *Eucalyptus dunnii* plantados em linha; cultivo de azevém ou aveia-preta no inverno e milho ou soja no verão; e pastejo por novilhas Purunã no inverno. Na área experimental, as classes de solos são Latossolo Vermelho, com textura média argilosa e horizonte superficial proeminente (rico em matéria orgânica), e com alta capacidade de troca catiônica na camada superficial. A altitude média é 953 m. Os indicadores avaliados são associados aos serviços ecossistêmicos de estoque de carbono, produtividade primária, conservação do solo e da água, qualidade do solo e produção de alimentos e madeira (Tabela 2).

Tabela 2. Serviços ecossistêmicos e indicadores avaliados nos Campos Gerais do Paraná⁽¹⁾.

Serviço ecossistêmico	Indicadores	O que avalia
Sequestro de carbono	Alterações nos estoques de carbono orgânico do solo (0–100 cm) Alterações dos estoques de nitrogênio orgânico do solo (0–100 cm); ou das emissões de N ₂ O; ou da oxidação de CH ₄	Capacidade do solo para sequestrar ou emitir carbono no/do solo; fertilidade do solo
Produtividade primária	Estoque de carbono na biomassa aérea	Capacidade da vegetação para sequestrar e estocar carbono; crescimento/desenvolvimento das plantas
Conservação da água e do solo	Infiltração de água Perda de N-NO ₃ do solo por lixiviação Perda de água por escoamento superficial Perda de solo (erosão)	Prevenção de erosão; retenção de água no solo; qualidade do solo Qualidade da água Retenção de água no solo; qualidade da água Prevenção de erosão
Conservação da biodiversidade	Distribuição de agregados no solo (hábitat); riqueza da macrofauna do solo; riqueza da mesofauna do solo	Abundância da biodiversidade da fauna edáfica; qualidade do solo (porosidade, densidade do solo, compactação, agregação, decomposição, atividade biológica e matéria orgânica)
Produção de alimentos e madeira	Produção de grãos; produção de carne; produção de madeira	Produtividades agrícola, pecuária e florestal

⁽¹⁾CH₄: metano; N₂O: óxido nitroso; N-NO₃: nitrato.

Fonte: Parron et al. (2015).

Os estoques de carbono e nitrogênio no solo e os fluxos de gases de efeito estufa – óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) – são importantes indicadores dos serviços ecossistêmicos de estoque de carbono, afetando a capacidade de estocagem dos solos. O fluxo de N₂O ocorre como emissão, ou

seja, os sistemas emitem N_2O em maior ou menor concentração. O fluxo de CH_4 é negativo quando ocorre sua oxidação ou consumo. Ambos são afetados por condições físicas (difusão de oxigênio, temperatura do solo e conteúdo de água), químicas (concentração de nitrato e amônio e disponibilidade de carbono facilmente metabolizável) e biológicas do solo (atividade microbiana) (Brevilieri et al., 2015).

Quanto maior a emissão de N_2O , maior é a degradação do solo. Os níveis de carbono orgânico do solo na profundidade 0–100 cm sob NF foram 11%, 10% e 3% maiores que NT, CLT e EP, respectivamente. Os níveis de nitrogênio orgânico do solo sob NF foram 5%, 12% e 7% maiores. O sistema NT emitiu mais N_2O ($2,7 \times 10^{-3}$ Mg ha N_2O ano⁻¹) do que os demais sistemas. No sistema ILPF, as emissões de N_2O são menores do que no NT, um fator positivo para a recomendação de sistemas integrados.

Para a maioria dos solos, quanto maior a oxidação de CH_4 , menor é o seu estado de degradação. A perturbação que ocorre durante o revolvimento do solo para o plantio pode modificar a população das bactérias metanogênicas, afetando a dinâmica do CH_4 . Os resultados indicam que o consumo de CH_4 pelo sistema ILPF é seis vezes menor que na NF. Os maiores valores de oxidação de CH_4 na NF ($10,8 \times 10^{-3}$ Mg CH_4 ha⁻¹ ano⁻¹) indicam que o solo da floresta atua como um dreno, retirando esse gás da atmosfera, portanto, apresenta maior potencial líquido de mitigação de CH_4 (Pergher, 2014). Então, solos sob sistemas agrícolas que adotam práticas de manejo conservacionistas tendem a emitir pouco N_2O e servir como dreno de CH_4 , conforme verificado no sistema de ILPF.

Os valores do estoque de carbono da biomassa aérea na NF e EP foram muito próximos entre si (176 e 169 Mg ha⁻¹) e 6,6 vezes maiores que no ILPF (26 Mg ha⁻¹). A riqueza da fauna edáfica e a agregação do solo podem ser considerados indicadores que influenciam diretamente no provimento de serviços ecossistêmicos que afetam a qualidade do solo. A diversidade da fauna do solo nos sistemas produtivos é menor que na NF.

Quanto maior a riqueza da meso e macrofauna edáfica, maiores são a decomposição de matéria orgânica, ciclagem de nutrientes, fluxos de gases, estoque de carbono, produtividade primária, agregação do solo, e a infiltração e capacidade de retenção de água no solo (Brown et al., 2015). Os menores valores desse índice ocorrem na NF (Zagatto, 2017). Por outro lado, quanto maior é a agregação do solo (medida pelo índice VESS), que representa o agrupamento de partículas primárias que compõem os agregados em diferentes estágios de formação, maior é a degradação da qualidade do solo, em termos de textura, porosidade, densidade, compactação, umidade, atividade biológica e matéria orgânica.

A melhoria da estrutura do solo contribui para o aumento da infiltração da água e redução do escoamento superficial, das perdas de solo, de água e de nitrato ($N-NO_3$), o que, por sua vez, ocasiona uma redução na transferência de poluentes – entre eles, sedimentos (solo) e agroquímicos – para cursos d'água (Power, 2010). Os maiores valores de infiltração ocorrem nos sistemas NF e EP, em que há mais biomassa vegetal e melhor qualidade física do solo (em razão do menor revolvimento por operações como gradagem). O sistema PD apresentou os menores índices estruturais e hidráulicos do solo. Os sistemas de uso da terra também influenciaram a qualidade da água de escoamento superficial. Em todos os sistemas agrícolas, as perdas de água e solo, bem como a perda de $N-NO_3$, ocorrem com valores muito reduzidos (Silva, 2016).

Com base nos indicadores avaliados, é possível afirmar que os sistemas integrados (ILPF) apresentam desempenho melhor em termos de serviços ecossistêmicos do que os sistemas com menor complexidade ecológica (EP e NT) e, evidentemente, os três sistemas apresentam desempenho inferior aos da NF. Nesse tipo de avaliação nos deparamos com os denominados *trade-offs*, que são efeitos ocasionados ao longo do tempo, como processos erosivos, de sedimentação e eutrofização dos corpos hídricos ou outros impactos indesejáveis em virtude de alterações ambientais ou antrópicas. Na tomada de decisão entre os *trade-offs* de produzir alimentos e de recuperar e conservar a cobertura vegetal nativa, os resultados apresentados poderiam auxiliar os agentes em um contexto de maximização dos benefícios sociais e ambientais para a instalação de agroecossistemas. Os resultados

permitem a internalização da dimensão ambiental, representada pelos serviços ecossistêmicos, na tomada de decisão, apesar da necessidade de avanço no número de serviços ecossistêmicos avaliados.

Geralmente, os sistemas ILPF são instalados como uma estratégia de recuperação das pastagens degradadas ou culturas com baixa produtividade. As primeiras lavouras têm como finalidade o condicionamento e a recuperação da fertilidade do solo. O mesmo pode ocorrer para a produção de carne. A partir do quinto ano, o ganho médio diário dos animais (GMD) foi de $0,86 \pm 0,310 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ animal, e o ganho animal foi de 90 kg ha^{-1} .

Os resultados mostram heterogeneidade dos serviços ecossistêmicos e a maximização dos serviços de provisão de acordo com a perda ou a redução de importantes serviços de suporte, regulação e culturais. Ainda, os resultados revelam apenas parte do custo ambiental envolvido na maximização dos serviços de provisão.

A produção de madeira no sistema EP implica a redução do estoque de carbono e nitrogênio orgânico no solo, a perda de água, a redução da biodiversidade, a redução da taxa de infiltração de água no solo, entre outros serviços ecossistêmicos afetados, quando comparados aos da floresta natural. Essa análise desconsidera o efeito negativo decorrente da colheita e do início do novo ciclo produtivo, em que o solo está mais suscetível às intempéries climáticas, que afetam negativamente os serviços ecossistêmicos. Os agroecossistemas de produção integrada e, portanto, de maior complexidade ecológica, como o ILPF, contribuem para a maximização dos serviços de provisão, mas também de outros serviços ecossistêmicos, estoque de carbono na biomassa aérea e no solo e perda de água e de solo. A permanência da cobertura vegetal nesses sistemas e a entrada do componente animal na área contribuem para a relativa estabilidade nos serviços ecossistêmicos, diferentemente do sistema EP, incluindo o pós-colheita e o reestabelecimento do ciclo produtivo, período que compromete esses serviços. Os sistemas integrados permitem a produção de alimentos, assim como a manutenção de importantes serviços ecossistêmicos.

Apesar das limitações apontadas, como a redução de biodiversidade de vegetação e fauna, os resultados mostram que o ILPF aborda um conjunto de serviços ecossistêmicos, que vão além dos de provisão, principalmente se for considerado que, no contexto de sistemas integrados, o policultivo de espécies florestais nativas pode substituir o uso de eucalipto. Embora esses sistemas tenham como finalidade criar uma cobertura vegetal que auxilie na proteção do solo e aumentar o potencial produtivo agrícola, o comprometimento com a restauração da biodiversidade, além dos benefícios já citados, também está relacionado com o aumento da produtividade das culturas, especialmente se o aumento de polinizadores for considerado. Comparações entre sistemas produtivos e áreas naturais revelam os *trade-offs* envolvidos na decisão de mudanças no uso das terras em termos de perda ou redução de serviços ecossistêmicos de regulação, provisão, suporte e culturais da floresta. Nesse aspecto, a avaliação dos indicadores revela parte desses *trade-offs* ou do custo de oportunidade envolvido na decisão, considerando que os serviços ecossistêmicos de áreas naturais são maiores do que os apresentados aqui (Parron et al., 2019).

Estudo de caso na região serrana do Rio de Janeiro

Considerando a abordagem da multifuncionalidade da paisagem para a geração de serviços ecossistêmicos e a importância dos processos participativos apresentados, apresenta-se um estudo de caso desenvolvido na região serrana do estado do Rio de Janeiro, especificamente na bacia do Pito Aceso, município de Bom Jardim, no bioma Mata Atlântica. A área possui clima predominantemente mesotérmico úmido (grupo climático subtropical úmido – Cfa), com temperatura média de $19 \text{ }^\circ\text{C}$, e uma precipitação anual de 1.400 mm , apresentando uma estação chuvosa de outubro a março. Está enquadrada na unidade geomorfológica dos morros reversos do planalto litorâneo da Serra dos Órgãos e apresenta relevo acentuado, com declives entre 45% e 60% .

Em termos geológicos, a região apresenta litologia metamórfica, e os tipos de rochas predominantes são granito, gnaisse granitoide, migmatitos e associações. A bacia hidrográfica de Pito Aceso mostra um mosaico típico de solo de ambiente de montanha sob cobertura de Mata Atlântica. Nas

áreas íngremes, é comum encontrar os Neossolos (afloramentos rochosos). Outras classes frequentes de solo na área são Argissolos, Cambissolos, Latossolos e Gleissolos (Chagas et al., 2012). Em geral, a região possui fragmentos florestais em diferentes estágios sucessionais. O domínio florístico é a floresta ombrófila densa.

Associações de culturas são uma prática comum na região e, de acordo com os agricultores, os efeitos sobre a fertilidade do solo e exploração do espaço são os principais fatores que determinam as associações de culturas. A rotação mais comum das culturas começa com o taro, seguido pela batata-doce e mandioca, deixando a terra descansando por um período relativamente curto (2–3 anos). O taro é a primeira cultura plantada após o período de pousio por causa das suas maiores necessidades de nutrientes em comparação com a batata-doce.

Outra característica do uso da terra nessa área é a agricultura itinerante, que foi introduzida por imigrantes europeus há 150 anos e ainda é praticada na parte mais alta dessa bacia. Esse manejo é caracterizado pela incorporação de períodos de pousio que possibilitam a recuperação do solo durante o período em que não está sob cultivo.

Crítérios para implantação e gerenciamento dos sistemas de produção foram definidos de forma participativa com a comunidade local, em reuniões nas associações de moradores e visitas individuais aos agricultores. Os desenhos dos sistemas produtivos foram baseados em Mattos et al. (2010) e Mattos (2015) e incluem: critérios gerais para o gerenciamento de sistemas de produção coletivamente estipulados; critérios específicos para a gestão dos sistemas de produção, estipulados individualmente de acordo com as aptidões específicas de cada agricultor, tendo em consideração os benefícios de consórcios e rotações para a fertilidade dos solos; controle de pragas e doenças; segurança alimentar e nutricional dos agricultores e suas famílias; e estratégias de mercado. Os critérios consolidados encontram-se na Tabela 3 (Turetta et al., 2016).

Posteriormente, essas informações foram sistematizadas e embasaram as prioridades para agroecossistemas, provisão de serviços ecossistêmicos e indicadores para monitorar as mudanças propostas. Também foram consideradas informações sobre políticas públicas, já que estas são cruciais no contexto de mudanças no setor agrícola e ambiental.

Observou-se que os serviços ecossistêmicos mais afetados pelos critérios elencados foram os de suporte e provisão (Tabela 3). Alguns autores também demonstraram a influência dos agroecossistemas na ciclagem de nutrientes, considerada um serviço ecossistêmico de suporte. Nesses estudos, evidencia-se o potencial de se alterar a ciclagem de nutrientes em sistemas de produção para manejo da fertilidade do solo, reduzindo o uso de fertilizantes sintéticos e suas emissões associadas de combustíveis fósseis (Lal, 2010; Schipanski et al., 2014; Yahdjian et al., 2015). Os critérios “nenhum uso de fogo” e “consórcio agrícola” foram os que apresentaram maior potencial para aumento da provisão de serviços ecossistêmicos (Tabela 3).

O conjunto de indicadores sugeridos para monitorar mudanças em cada agroecossistema, a fim de mostrar o efeito dos manejos propostos nas funções do solo, são apresentados na Tabela 3. A recomendação de parâmetros simples e de fácil aquisição que possam ser utilizados como indicadores foi priorizada, assim como os já amplamente utilizados e validados pela ciência do solo. Estoque de biomassa no solo e serapilheira foram os parâmetros de solo considerados os mais apropriados para serem utilizados como indicadores para o monitoramento do impacto dos agroecossistemas na provisão de serviços. Muitos trabalhos demonstram o importante papel da biomassa do solo pela concentração de carbono orgânico em sua composição e pela forma como interfere na dinâmica do solo (Bolin et al., 2000; Ogle et al., 2005; Cowie et al., 2006).

Quatro políticas públicas brasileiras foram identificadas como aquelas com maior potencial de acolhimento aos serviços fornecidos pelos agroecossistemas: o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC – art. 3º do Decreto nº 7.390/2010); o Programa de Aquisição de Alimentos (PAA – art. 19 da Lei nº 10.696/2003); o Programa Produtor de Água, da Agência Nacional

de Águas (ANA) e o Programa Nacional de Alimentação Escolar (Pnae). Todos esses programas oferecem aos agricultores a oportunidade de aumentar sua produtividade, estimulando a mudança dos sistemas de produção convencionais para sistemas que adotem práticas conservacionistas de manejo do solo.

Assim, fica evidenciado que, ao considerar o potencial multifuncional dos agroecossistemas, é preciso fazer uma análise ampla de fatores que influenciem na relação entre agroecossistemas e prestação de serviços ecossistêmicos. Esse tema deve continuar sendo explorado por pesquisas e ampliado para outras regiões e sistemas produtivos a fim de deixar cada vez mais robustas as evidências dessa relação (Turetta et al., 2016).

Tabela 3. Critérios para estabelecimento e gestão dos agroecossistemas⁽¹⁾.

Critério para implantação e desenvolvimento dos agroecossistemas	Tipo de serviço ecossistêmico			Função do solo associada	Parâmetro do solo ou indicador potencial de solo
	Provisão	Suporte	Regulação		
Nenhum uso do fogo	+++	+++	+++	Infiltração da água/hábitat	Porosidade do solo Densidade do solo Condutividade hidráulica Biomassa e estoque de carbono no solo e serapilheira Atividade microbiana Macrofauna do solo
Uso racional de agroquímicos (fertilizantes e pesticidas)	+++	+++	++	Ciclagem de nutrientes/hábitat	Complexo sortivo do solo Soma de bases Biomassa e estoque de carbono no solo e serapilheira Atividade microbiana Macrofauna do solo
Cobertura permanente do solo	+++	+++	+++	Infiltração da água/ciclagem de nutrientes/retenção de sedimentos/hábitat	Complexo sortivo do solo Soma de bases Porosidade do solo Densidade do solo Condutividade hidráulica Macrofauna do solo
Rotação de culturas	+++	+++	++	Infiltração da água/ciclagem de nutrientes/retenção de sedimentos/sequestro e acumulação de carbono/hábitat	Complexo sortivo do solo Soma de bases Porosidade do solo Densidade do solo Condutividade hidráulica Biomassa e estoque de carbono no solo e serapilheira Atividade microbiana Macrofauna do solo
Consórcio agrícola	+	++	++	Ciclagem de nutrientes/retenção de sedimentos/sequestro e acumulação de carbono/hábitat	Complexo sortivo do solo Soma de bases Biomassa e estoque de carbono no solo e serapilheira Atividade microbiana Macrofauna do solo
Estratégia para uso da água na propriedade rural	++	+++	+++	Regulação hídrica/retenção de sedimentos	Porosidade do solo Densidade do solo Condutividade hidráulica Curva de retenção

⁽¹⁾Estimativas qualitativas relacionadas ao impacto dos critérios selecionados nos tipos de serviços ecossistêmicos são representadas por: baixo impacto

(+) a alto impacto (+++).

Fonte: Turetta et al. (2016).

Oportunidades e desafios da abordagem dos serviços ecossistêmicos do solo e da água com vista à sustentabilidade na paisagem rural

Os temas ambientais estão na pauta do dia em diversos setores da sociedade, bem como em diferentes escalas: local, regional e global. As preocupações vão desde o pequeno produtor, que se vê atualmente pressionado pela legislação a realizar a adequação ambiental de sua propriedade – e seus produtos e papel podem ser mais valorizados quando opta por uma agricultura mais sustentável –, passando pelas empresas públicas e privadas, que buscam associar sua marca a causas socioambientais, pressionadas por consumidores cada vez mais exigentes. E as preocupações se estendem às exigências do mercado internacional em relação às boas práticas socioambientais na produção de commodities. Estão presentes também nas grandes conferências e fóruns mundiais, em que têm sido realizados acordos internacionais para a adoção, por parte dos governos, de medidas mais sustentáveis no desenvolvimento econômico mundial. O lançamento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) pela Organização das Nações Unidas (ONU), para os quais diversos países têm se proposto a contribuir, é um exemplo.

Nesse contexto, o setor agropecuário deve buscar oportunidades para que ocorram mudanças efetivas, buscando práticas e sistemas de manejo mais sustentáveis e, ainda, revertendo ou mitigando os impactos negativos que o manejo inadequado das terras tem causado ao ambiente.

A adoção do conceito de serviços ecossistêmicos do solo e da água na formulação de políticas pode ser uma ferramenta robusta para definir estratégias de gestão dos recursos naturais ou mesmo rever algumas políticas em andamento. Outra oportunidade que se vislumbra é a avaliação ou monitoramento do impacto de políticas públicas, programas de governo e linhas de crédito com foco na conservação e na agricultura de baixa emissão de carbono, visando a cumprir os acordos internacionais, bem como a legislação ambiental brasileira. Também se trata de oportunidade para o desenvolvimento, pelo setor de pesquisa, de ferramentas de apoio a essas iniciativas conservacionistas, seja na sua implantação, seja na sua avaliação ou disseminação.

Política Nacional de Mudanças Climáticas (Lei nº 12.187 de 2009) e Plano de Agricultura de Baixo Carbono (ABC)

Essa política visa a cumprir os compromissos voluntários nacionais de redução das emissões de gases de efeito estufa e do desmatamento; e conceder benefícios e créditos para os agricultores que querem adotar práticas agrícolas sustentáveis na propriedade. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2012b) estabeleceu como metas do plano ABC: recuperar pastagens degradadas (15 milhões de hectares), aumentar a área de ILPF e sistemas agroflorestais (SAFs) (4 milhões de hectares), aumentar a área de Sistema Plantio Direto (SPD) (8 milhões de hectares), aumentar a área de aplicação da Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN) (5,5 milhões de hectares), aumentar a área das Florestas Plantadas (3 milhões de hectares), aumentar o volume de dejetos animais tratados (4,4 milhões de metros cúbicos) e fomentar a adaptação às mudanças climáticas (em áreas prioritárias). Um novo ciclo do Plano ABC foi recém-lançado, prometendo manter o País como potência agroambiental (Brasil, 2021b). Com escopo mais amplo, o ABC+ 2020–2030 terá forte estímulo da inovação tecnológica e avançará em outras cadeias produtivas importantes para o País, como café, cacau, frutíferas, algodão e soja. A ideia central dessa nova fase é que estes sistemas sejam mais resilientes e eficientes em relação à produção, ou seja, emitam menos gases de efeito estufa (Brasil, 2021b). No âmbito dessa política, uma oportunidade é avaliar e monitorar as alterações nos serviços ecossistêmicos de solo (incluindo o estoque de carbono) e água (superficial e subterrânea) em áreas experimentais, por longo prazo, por meio das intervenções, testando inclusive diferentes modelos de plantio (diferentes espécies, espaçamento, manejo, etc.).

Programa Produtor de Água da Agência Nacional de Águas

Trata-se de um instrumento econômico que envolve o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) com foco na água e representa um caminho promissor para a proteção de mananciais. Esse programa está sendo adotado pelos comitês de bacias hidrográficas e órgãos gestores de recursos hídricos

em diferentes biomas brasileiros. Os potenciais benefícios incluem redução da poluição difusa, de assoreamentos e dos custos de tratamento de água, entre outros (Santos et al., 2010; Prado et al., 2019). No entanto, os gestores têm encontrado muitas dificuldades na sua implantação e no monitoramento de seus impactos. Muitas dessas lacunas podem ser preenchidas com o apoio da pesquisa.

Código Florestal (Lei nº 12.727 de 2012)

Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa brasileira (Áreas de Preservação Permanente – APP e Reserva Legal – RL) (Brasil, 2012a). No seu artigo 41, atribui ao Poder Executivo Federal o estabelecimento de um programa de apoio e fomento à conservação do meio ambiente, por meio do PSA, como retribuição às atividades que impactam positivamente os serviços ecossistêmicos, tais como o estoque de carbono, a conservação da beleza cênica, da biodiversidade e dos recursos hídricos, além da regulação do clima. Esse programa deverá integrar as ações nos âmbitos nacional e estadual, com o objetivo de criar um mercado de serviços ambientais (Leite & Anguita, 2017). Também há oportunidades de pesquisa no âmbito da lei atual de Pagamento por Serviços Ambientais – Lei nº 14.119 de 2021 (Brasil, 2021a), complementar ao Código Florestal. Essas oportunidades se relacionam ao monitoramento do impacto de diferentes modelos de restauração de APP e de Reserva Legal nos serviços ecossistêmicos, bem como estudos de fluxos de serviços ecossistêmicos entre a produção agropecuária e os fragmentos florestais. Quanto a isso, podem-se avaliar a permeabilidade dos diferentes usos da terra, a fauna, a conectividade e o nível de fragmentação dos fragmentos florestais, a polinização por insetos e aves, o controle de pragas, entre outras possibilidades.

Nesse contexto, a avaliação dos serviços ecossistêmicos e sua valoração também ganham importância. A valoração econômico-ecológica é uma metodologia de valoração de recursos naturais que vem sendo desenvolvida no âmbito da corrente teórica em economia do meio ambiente chamada de economia ecológica (Andrade & Romeiro, 2009). A valoração consiste em conferir valores econômicos aos diversos serviços gerados pelos ecossistemas à humanidade, sendo um mecanismo para orientar a tomada de decisão de políticas públicas.

Brant (2011) afirma que na literatura estão descritos diversos métodos de valoração capazes de fazer a ligação entre a provisão dos serviços ecossistêmicos e a estimativa econômica dos benefícios decorrentes desses recursos. Cada método apresenta limitações na estimativa de valores, as quais estão relacionadas ao grau de sofisticação da base de dados e da metodologia empregada (Motta, 2006).

Segundo Costanza et al. (2014), a valoração não significa privatização ou “comodificação” dos serviços ecossistêmicos, uma vez que são tratados como bens públicos ou comuns. Os serviços ecossistêmicos não são geridos por mercados convencionais, sendo importante a valoração para, por exemplo, nortear agências ou outros entes públicos responsáveis pela conservação dos serviços ecossistêmicos, quanto à prioridade de investimentos em ações de preservação, conservação, recuperação e manutenção.

Ao avaliar e valorar os serviços ecossistêmicos, gerados pelo manejo conservacionista na agropecuária, além de dar apoio à tomada de decisão na gestão dos recursos naturais que são finitos e estão se esgotando, podem-se gerar respostas e argumentos para conquistar novos mercados nacionais e internacionais com exigência de certificação de produção sustentável, e obter linhas de crédito com foco conservacionista e PSA em alguns casos, com possibilidade de agregação de valor à produção. Importantes também são o diálogo e a negociação contínua das políticas e ações voltadas ao meio ambiente e agricultura, para que se possam obter avanços efetivos na agenda da sustentabilidade no Brasil. O turismo rural e o agroturismo devem se inserir na agenda dessas políticas pois, ao manejar bem e restaurar a paisagem onde se inserem os agroecossistemas, pode-se explorá-la em termos de visitação, recreação e outras atividades que podem agregar valor às propriedades rurais.

Por outro lado, uma crítica às iniciativas que envolvem os serviços ecossistêmicos é referente à falta de dados ou informações robustas para avaliar a provisão dos serviços em diferentes áreas, sob diferentes usos da terra e práticas de manejo. O desenvolvimento de metodologias para mapear e

modelar os serviços ecossistêmicos deve ser aprimorado, mas para isso também é necessário cobrir lacunas de informações em escalas adequadas. Além disso, o uso dessas informações pela sociedade e na formulação de políticas requer uma efetiva comunicação de seus resultados, em linguagem adequada, além da necessidade de validar esses resultados, tornando conhecidas as incertezas e imprecisões em face dos métodos e modelos empregados. É preciso avançar nas formas de apresentar esses resultados à sociedade interessada, seja na forma de índices, seja de aplicativos, sistemas digitais de suporte à decisão e outros.

Em relação aos solos na paisagem rural, a diversidade é muito grande, e muitos fatores naturais e antrópicos podem interferir em sua resposta enquanto serviços ecossistêmicos providos. Dessa forma, não se pode ignorar que a economia das diferentes regiões e biomas brasileiros depende do conhecimento sobre esse recurso. A esse respeito, o Programa Nacional de Solos (PronaSolos) tem como propósito retomar a realização dos levantamentos pedológicos em caráter multiescalar e respectivas interpretações, de forma contínua, de acordo com as necessidades identificadas por um consórcio nacional multi-institucional e compatibilizadas com as demandas de políticas dos governos federal e estaduais. Busca-se também estabelecer uma base de dados integrada, na qual as informações de solos provenientes de trabalhos anteriores e as que vierem a ser produzidas estejam organizadas e sistematizadas para consulta do público em geral. Espera-se que possa trazer subsídios à avaliação e valoração de SE de solos para efeitos de planejamento no setor agropecuário.

Sobre os dados relacionados à água, seja sobre quantidade ou qualidade, o que permite avaliar serviços ecossistêmicos de regulação e provisão hídrica, controle da erosão e inundação, além da manutenção da biodiversidade, pode-se dizer que existem algumas bases nacionais com informação organizada e disponível, como é o caso do Portal Hidroweb, da Agência Nacional de Águas. Trata-se de uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) que oferece o acesso ao banco de dados com todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos. Consiste em uma importante ferramenta para a sociedade e instituições públicas e privadas, pois os dados coletados pelas estações hidrometeorológicas são imprescindíveis para a gestão dos recursos hídricos e diversos setores econômicos, como geração de energia, irrigação, navegação e indústria, além do projeto, manutenção e operação de infraestrutura hidráulica de pequeno e grande porte, como barragens, drenagem pluvial urbana e mesmo bueiros e telhados.

Contudo, quando se trata da avaliação de serviços ecossistêmicos relacionados à agropecuária, essa base de dados é limitada, pelas lacunas que apresenta em suas séries históricas e escala de cobertura espacial. Estudos em escalas locais em que se possam monitorar os impactos dos diferentes usos e manejos da terra nos serviços ecossistêmicos hídricos tornam-se importantes. Mas, para tal, os desafios se relacionam aos investimentos em recursos humanos e equipamentos, podendo ser mitigados com parcerias interinstitucionais, como vem ocorrendo no monitoramento dos PSA hídricos no Brasil (Fidalgo et al., 2017). Por outro lado, em muitos casos de avaliação de serviços ecossistêmicos, é possível fazer uso de dados existentes, obtidos em escala local por redes de pesquisa ou por dissertações e teses. Prado (2014) menciona várias redes e iniciativas de pesquisa no Brasil, que têm contribuído para a obtenção de uma série de dados passíveis de utilização para a avaliação de serviços ecossistêmicos. No caso de mapeamentos, modelagem e geração de cenários, os mapas temáticos obtidos em diferentes escalas no País também são fundamentais.

Outra lacuna e desafio que se tem enfrentado ao estudar os impactos do manejo conservacionista dos agroecossistemas sob a ótica dos serviços ecossistêmicos é compreender sua relação com o bem-estar da comunidade envolvida (benefícios socioeconômicos), seja o beneficiário um produtor rural, seja uma associação de produtores rurais ou uma cooperativa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A compreensão dos conceitos e métodos de avaliação e valoração dos SE do solo e da água na paisagem rural, com a presença de agroecossistemas, e de sua relação com as múltiplas funções que eles fornecem, permite que a real importância desses recursos seja internalizada por diferentes setores da sociedade e por tomadores de decisão.

Contudo, apesar dos avanços obtidos, métodos de avaliação e valoração dos serviços ecossistêmicos do solo e da água ainda precisam ser aprimorados e validados em diferentes escalas. Embora a abordagem de avaliação e valoração dos SE em escala de propriedade rural se diferencie da utilizada para avaliá-los na paisagem, a qualidade da informação sobre o solo e a água é essencial para o correto planejamento e identificação dos benefícios advindos do manejo adequado e da conservação para o bem-estar humano. Por isso a grande importância de bases de dados consistentes e em escala adequada.

A avaliação dos impactos de políticas públicas com foco na conservação da paisagem rural e de agroecossistemas também é muito importante, permitindo atrair novos investidores e parceiros nos processos de compensação, assim como para o redirecionamento de ações. A valoração de serviços ecossistêmicos é uma ferramenta importante no processo de convencimento e internalização dos custos dos recursos naturais, matéria-prima fundamental aos processos de produção agropecuária.

Também é preciso avançar na conscientização de que a sustentabilidade, tão almejada, somente será obtida por meio da valorização do papel de todos – agricultores, empresas, consumidores, pesquisadores e ambientalistas –, uma vez que todos são beneficiados pela provisão dos SE. Outro aspecto importante é que as ações conservacionistas na paisagem rural devem ser contínuas, para manter constante e em equilíbrio a relação entre demanda humana e a provisão de SE.

Sobretudo, para valorizar o papel dos produtores rurais para a conservação e manejo adequado dos recursos naturais, é preciso desenvolver, adaptar e aperfeiçoar métodos para a certificação de sua produção sob sistemas agropecuários sustentáveis, recompensando-os economicamente pelo seu empenho.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D.C.; ROMEIRO, A.R. **Serviços ecossistêmicos e sua importância para o sistema econômico e o bem-estar humano**. Campinas: IE, Unicamp, 2009. 44p. (IE/Unicamp. Texto para discussão, n.155).
- ASBJORNSEN, H.; HERNANDEZ-SANTANA, V.; LIEBMAN, M.; BAYALA, J.; CHEN, J.; HELMERS, M.; ONG, C.K.; SCHULTE, L.A. Targeting perennial vegetation in agricultural landscapes for enhancing ecosystem services. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v.29, p.101-125, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1742170512000385>.
- BARRIOS, E. Soil biota, ecosystem services and land productivity. **Ecological Economics**, v.64, p.269-285, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8.ed. São Paulo: Ícone, 2012. 335p.
- BLUM, W.E.H. Functions of soil for society and the environment. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v.4, p.75-79, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-005-2236-x>.
- BOLIN, B.; SUKUMAR, R.; CIAIS, P.; CRAMER, W.; JARVIS, P.; KHESHGI, H.; NOBRE, C.; SEMENOV, S.; STEFFEN, W. Global perspectives. In: WATSON, R.T.; NOBLE, I.R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N.H.; VERARDO, D.J.; DOKKEN, D.J. (Ed.). **Land use, land-use changes, and forestry: summary for policymakers: a special report of the Intergovernmental Panel Climate Changes**. Cambridge: Cambridge University, 2000. p.23-51.
- BRAAT, L.C.; DE GROOT, R. The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. **Ecosystem Services**, v.1, p.4-15, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>.
- BRANT, F.F. **Valoração econômica ambiental como estratégia de conservação dos recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé: uma proposta metodológica**. 2011. 116p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Macaé.

BRASIL. Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da União**, 18 out. 2012a. Seção1, p.1-3.

BRASIL. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nºs 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. **Diário Oficial da União**, 14 jan. 2021a. Seção1, p.7-9.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030)**: visão estratégica para um novo ciclo. Brasília, 2021b. 27p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília, 2021b. 173p.

BRAUMAN, K.A.; DAILY, G.C.; DUARTE, T.K.; MOONEY, H.A. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. **Annual Review of Environment and Resources**, v.32, p.67-98, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>.

BREVILIERI, R.C.; DIECKOW, J. Mitigação de emissões de gases de efeito estufa em solos agrícolas e florestais como indicador de serviços ambientais. In: PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, E.B. de; BROWN, G.G.; PRADO, R.B. (Ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do bioma Mata Atlântica**. Brasília: Embrapa, 2015. p.109-121.

BROWN, G.G.; NIVA, C.C.; ZAGATTO, M.R.G.; FERREIRA, S. de A.; NADOLNY, H.S.; CARDOSO, G.B.X.; SANTOS, A.; MARTINEZ, G. de A.; PASINI, A.; BARTZ, M.L.C.; SAUTTER, K.D.; THOMAZINI, M.J.; BARETTA, D.; SILVA, E. da; ANTONIOLLI, Z.I.; DECAËNS, T.; LAVELLE, P.M.; SOUSA, J.P.; CARVALHO, F. Biodiversidade da fauna do solo e sua contribuição para os serviços ambientais. In: PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, E.B. de; BROWN, G.G.; PRADO, R.B. (Ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do bioma Mata Atlântica**. Brasília: Embrapa, 2015. p.122-154.

BURGESS, N.D.; DARRAH, S.; KNIGHT, S.; DANKS, F.S. **Approaches to mapping ecosystem services**. Cambridge: United Nations Environment Programme, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Sarah_Darrah/publication/310600142_Approaches_to_mapping_ecosystem_services/links/5832de5908ae102f0736385d/Approaches-to-mapping-ecosystem-services.pdf>. Acesso em: 4 fev. 2021.

BURKHARD, B.; MAES, J. (Ed.). **Mapping ecosystem services**. Sofia: Pensoft, 2017. 374p. DOI: <https://doi.org/10.3897/ab.e12837>.

CERVI, A.C.; von LINSINGEN, L.; HATSCHBACH, G.; RIBAS, O.S. A vegetação do Parque Estadual de Vila Velha, município de Ponta Grossa, Paraná, Brasil. **Boletim do Museu Botânico Municipal**, v.69. p.1-52, 2007.

CHAGAS, C. da S.; CALDERANO FILHO, B.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; BHERING, S.B. **Levantamento semidetalhado dos solos da microbacia do Córrego do Pito Aceso, município de Bom Jardim, região serrana do Estado do Rio de Janeiro - RJ**. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2012. 107p. (Embrapa Solos. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 219). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/110756/1/BPD-219-Levant-Microbacia-Pito-Aceso-1.pdf>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

CONG, R.-G.; EKROOS, J.; SMITH, H.G.; BRADY, M.V. Optimizing intermediate ecosystem services in agriculture using rules based on landscape composition and configuration indices. **Ecological Economics**, v.128, p.214-223, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.05.006>.

COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; SUTTON, P.; van der PLOEG, S.; ANDERSON, S.J.; KUBISZEWSKI, I.; FARBER, S.; TURNER, R.K. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v.26, p.152-158, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>.

COWIE, A.L.; SMITH, P.; JOHNSON, D. Does soil carbon loss in biomass production systems negate the greenhouse benefits of bioenergy? **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v.11, p.979-1002, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11027-006-9030-0>.

DAILY, G.C.; ALEXANDER, S.; EHRLICH, P.R.; GOULDER, L.; LUBCHENCO, J.; MATSON, P.A.; MOONEY, H.A.; POSTEL, S.; SCHNEIDER, S.H.; TILMAN, D.; WOODWELL, G.M. Ecosystem services: benefits supplied to human societies by natural ecosystems. **Issues in Ecology**, n.2, p.1-18, 1997.

DECLERCK, F.A.J.; JONES, S.K.; ATTWOOD, S.; BOSSIO, D.; GIRVETZ, E.; CHAPLIN-KRAMER, B.; ENFORS, E.; FREMIER, A.K.; GORDON, L.J.; KIZITO, F.; NORIEGA, I.L.; MATTHEWS, N.; MCCARTNEY, M.; MEACHAM, M.; NOBLE, A.; QUINTERO, M.; REMANS, R.; SOPPE, R.; WILLEMEN, L.; WOOD, S.L.R.; ZHANG, W. Agricultural ecosystems and their services: the vanguard of sustainability? **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v.23, p.92-99, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.11.016>.

- 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: <https://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, p.1858-1868, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>.
- DURU, M.; THEROND, O.; MARTIN, G.; MARTIN-CLOUAIRE, R.; MAGNE, M.-A.; JUSTES, E.; JOURNET, E.-P.; AUBERTOT, J.-N.; SAVARY, S.; BERGEZ, J.-E.; SARTHOU, J.P. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.35, p.1259-1281, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0306-1>.
- FERREIRA, J.; PARDINI, R.; METZGER, J.P.; FONSECA, C.R.; POMPEU, P.S.; SPAROVEK, G.; LOUZADA, J. Towards environmentally sustainable agriculture in Brazil: challenges and opportunities for applied ecological research. **Journal of Applied Ecology**, v.49, p.535-541, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02145.x>.
- FERREIRA, L.G.; SOUSA, S.B. de; ARANTES, A.E. **Radiografia das pastagens do Brasil**. Goiânia: [s.n.], 2014. 214p.
- FIDALGO, E.C.C.; PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; SCHULER, A.E. (Ed.). **Manual para pagamento por serviços ambientais hídricos: seleção de áreas e monitoramento**. Brasília: Embrapa, 2017. 78p.
- FREITAS, P.L. de; LANDERS, J.N. The transformation of agriculture in Brazil through development and adoption of zero tillage conservation agriculture. **International Soil and Water Conservation Research**, v.2, p.35-46, 2014. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30012-5](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30012-5).
- FUNDAÇÃO COPPETEC. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – Resumo: diagnóstico dos recursos hídricos: relatório parcial**. [Resende]: Laboratório de Hidrologia e Estudos de Meio Ambiente, 2006.
- GARBACH, K.; MILDNER, J.C.; MONTENEGRO, M.; KARP, D.S.; DECLERCK, F.A.J. Biodiversity and ecosystem services in agroecosystems. **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**, v.2, p.21-40, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00013-9>.
- GREEN, S.; VAN DEN DIJSSEL, C.; SNOW, V.; CLOTHIER, B.E.; TREVOR, W.; RUSSELL, J.; IRONSIDE, N.; DAVIDSON, P. SPASMO: a risk assessment model of water, nutrient and chemical fate under agricultural lands. In: CURRIE, L.D.; HANLY, J.A. (Ed.). **Tools for nutrients and pollutant management: applications to agriculture and environmental quality**. Palmerston North: Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, 2003. p.321-335.
- GUERRA, A.J.T.; FULLEN, M.A.; JORGE, M. do C.O.; ALEXANDRE, S.T. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v.37, p.81-91, 2014. DOI: https://doi.org/10.11137/2014_1_81_91.
- HAYGARTH, P.M.; RITZ, K. The future of soils and land use in the UK: soil systems for the provision of land-based ecosystem services. **Land Use Policy**, v.26, p.S187-S197, 2009. Suppl.1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.016>.
- HEWITT, A.; DOMINATI, E.; WEBB, T.; CUTHILL, T. Soil natural capital quantification by the stock adequacy method. **Geoderma**, v.241-242, p.107-114, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.014>.
- IDR Paraná. Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná. **Médias históricas em estações do IDR Paraná**: estação Ponta Grossa: 1954/2001. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/system/files/publico/agrometeorologia/medias-historicas/Ponta_Grossa.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2022.
- IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M.I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J.B.R.; MAYCOCK, T.K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (Ed.). **Climate Change 2021: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546013.003>.
- ITCG. Instituto de Terras, Cartografia e Geociências. **Formações fitogeográficas – estado do Paraná**. 2009. Disponível em: <http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mapa_fitogeografico_a3.pdf>. Acesso em: 4 fev. 2021.
- JANES BASSETT, V.; DAVIES, J. **Soil natural capital valuation in agri-food businesses**. [S.l.: s.n.], 2018. 12p. (Valuing Nature Natural Capital Synthesis Report, VNP08).
- JÓNSSON, J.Ö.G.; DAVÍÐSDÓTTIR, B. Classification and valuation of soil ecosystem services. **Agricultural Systems**, v.145, p.24-38, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.010>.
- KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.4-10, 1997. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.
- LAL, R. Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. **BioScience**, v.60, p.708-721, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.8>.
- LANDIS, D.A. Designing agricultural landscapes for biodiversity-based ecosystem services. **Basic and Applied Ecology**, v.18, p.1-12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.baae.2016.07.005>.

- LAPOLA, D.M.; MARTINELLI, L.A.; PERES, C.A.; OMETTO, J.P.H.B.; FERREIRA, M.E.; NOBRE, C.A.; AGUIAR, A.P.D.; BUSTAMANTE, M.M.C.; CARDOSO, M.F.; COSTA, M.H.; JOLY, C.A.; LEITE, C.C.; MOUTINHO, P.; SAMPAIO, G.; STRASSBURG, B.B.N.; VIEIRA, I.C.G. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, v.4, p.27-35, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2056>.
- LEITE, M.B.; ANGUIA, P.M. de. Classificação das políticas públicas relacionadas com os serviços ecossistêmicos no território brasileiro. **Boletim Goiano de Geografia (Online)**, v.37, p.106-121, 2017.
- MATTOS, L. Caracterização agrônômica dos sistemas de produção e análise dos processos de tomada de decisão sobre uso da terra nos estabelecimentos rurais que compõem a Associação de Agricultura Ecológica (AGE)/Distrito Federal (DF). In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 53., 2015, João Pessoa. **Agropecuária, meio ambiente e desenvolvimento: anais**. João Pessoa: Sober, 2015.
- MATTOS, L.; BRONDIZIO, E.; ROMEIRO, A.; ORAIR, R. Agricultura de pequena escala e suas implicações na transição agroecológica da Amazônia Brasileira. **Amazônica**, v.2, p.264-292, 2010. DOI: <https://doi.org/10.18542/amazonica.v2i2.399>.
- MCBRATNEY, A.; FIELD, D.J.; KOCH, A. The dimensions of soil security. **Geoderma**, v.213, p.203-213, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>.
- MCNEILL, J.R.; MCNEILL, W.H. **The human web: a bird's-eye view of world history**. New York: W.W. Norton, 2003. 350p.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: a framework for assessment**. Washington: Island Press, 2003. 212p.
- MOTTA, R.S. da. **Economia ambiental**. Rio de Janeiro: FGV, 2006. 228p.
- NICHOLSON, E.; MACE, G.M.; ARMSWORTH, P.R.; ATKINSON, G.; BUCKLE, S.; CLEMENTS, T.; EWERS, R.M.; FA, J.E.; GARDNER, T.A.; GIBBONS, J.; GRENYER, R.; METCALFE, R.; MOURATO, S.; MUÛLS, M.; OSBORN, D.; REUMAN, D.C.; WATSON, C.; MILNER-GULLAND, E.J. Priority research areas for ecosystem services in a changing world. **Journal of Applied Ecology**, v.46, p.1139-1144, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01716.x>.
- OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. **Multifunctionality: towards an analytical framework: agriculture and food**. Paris, 2001. 159p. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264192171-en>.
- OECD/FAO Agricultural Outlook 2021-2030. Paris: OECD, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1787/19428846-en>.
- OGLE, S.M.; BREIDT, F.J.; PAUSTIAN, K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. **Biogeochemistry**, v.72, p.87-121, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0360-2>.
- PALM, C.; BLANCO-CANQUI, H.; DECLERCK, F.; GATERE, L.; GRACE, P. Conservation agriculture and ecosystem services: an overview. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.187, p.87-105, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>.
- PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; MOREIRA, J.M.M.A.P.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V. Avaliação de serviços ecossistêmicos em sistemas agrossilvipastoris. **Revista Iberoamericana de Economía Ecológica**, v.30, p.81-100, 2019.
- PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; RACHWAL, M.F.G.; FRANCHINI, J.C.; FRANCISCON, L.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; BROWN, G.G. Avaliação de serviços ambientais no âmbito do projeto ServiAmbi. In: PARRON, L.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, E.B. de; BROWN, G.G.; PRADO, R.B. (Ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do bioma Mata Atlântica**. Brasília: Embrapa, 2015. p.36-46.
- PERGHER, M. **Emissão de óxido nitroso e metano do solo e de dejetos bovinos em sistemas integrados de produção com ILP e ILPF**. 2014. 48p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- POWER, A.G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. **Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences**, v.365, p.2959-2971, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>.
- POWLSON, D.S.; GREGORY, P.J.; WHALLEY, W.R.; QUINTON, J.N.; HOPKINS, D.W.; WHITMORE, A.P.; HIRSCH, P.R.; GOULDING, K.W.T. Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. **Food Policy**, v.36, p.S72-S87, 2011. Suppl.1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.11.025>.
- PRADO, R.B. Serviços ecossistêmicos e ambientais na agropecuária. In: PALHARES, J.C.P.; GEBLER, L. (Ed.). **Gestão ambiental na agropecuária**. Brasília: Embrapa, 2014. p.413-456.
- PRADO, R.B.; FIDALGO, E.C.C.; MONTEIRO, J.M.G.; SCHULER, A.E.; VEZZANI, F.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, A.P. de; VIANA, J.H.M.; PEDREIRA, B. da C.C.G.; MENDES, I. de C.; REATTO, A.; PARRON, L.M.; CLEMENTE, E. de P.; DONAGEMMA, G.K.; TURETTA, A.P.D.; SIMÕES, M. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.1021-1038, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900002>.
- PRADO, R.B.; FORMIGA-JOHNSON, R.M.; MARQUES, G. Uso e gestão da água: desafios para a sustentabilidade no meio rural. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, p.43-48, 2017.
- PRADO, R.B.; INÁCIO, M. da C.; LIMA, A.P.M. de; SCHULER, A.E.; GUIMARÃES, J.L.B.; FIDALGO, E.C.C.; TURETTA, A.P.D.; MONTEIRO, J.M.G.; MARTINS, A.L. da S.; OLIVEIRA, A.P. de; CLEMENTE, E. de P.; PEDREIRA, B. da C.C.G. Evolução

- das iniciativas de pagamentos por serviços ambientais hídricos no Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v.36, e26444, 2019. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2019.v36.26444>.
- REZENDE, C.L.; SCARANO, F.R.; ASSAD, E.D.; JOLY, C.A.; METZGER, J.P.; STRASSBURG, B.B.N.; TABARELLI, M.; FONSECA, G.A.; MITTERMEIER, R.A. From hotspot to hopespot: an opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v.16, p.208-214, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>.
- ROBINSON, D.A.; FRASER, I.; DOMINATI, E.J.; DAVÍÐSDÓTTIR, B.; JÓNSSON, J.O.G.; JONES, L.; JONES, S.B.; TULLER, M.; LEBRON, I.; BRISTOW, K.L.; SOUZA, D.M.; BANWART, S.; CLOTHIER, B.E. On the value of soil resources in the context of natural capital and ecosystem service delivery. **Soil Science Society of America Journal**, v.78, p.685-700, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0017>.
- ROBINSON, D.A.; HOCKLEY, N.; DOMINATI, E.; LEBRON, I.; SCOW, K.M.; REYNOLDS, B.; EMMETT, B.A.; KEITH, A.M.; DE JONGE, L.W.; SCHJØNNING, P.; MOLDRUP, P.; JONES, S.B.; TULLER, M. Natural capital, ecosystem services, and soil change: why soil science must embrace an ecosystems approach. **Vadose Zone Journal**, v.11, v.11, vzj2011.0051, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0051>.
- ROSTIROLLA, S.P. (Coord.). **Projeto Mapeamento Geológico da Folha de Ponta Grossa (1:100.000): relatório final**. Curitiba: Mineropar, 2007.
- SANTOS, D.G. dos; DOMINGUES, A.F.; GISLER, C.V.T. Gestão de recursos hídricos na agricultura: o Programa Produtor de Água. In: PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G. (Org.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p.353-376.
- SANTOS, H.G.; BHERING, S.B.; BOGNOLA, I.A.; CURCIO, G.R.; MANZATTO, C.V.; CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C. da S.; AGLIO, M.L.D.; SOUZA, J.S. de. Distribuição e ocorrência dos solos no Estado do Paraná. In: BHERING, S.B.; SANTOS, H.G. dos (Ed.). **Mapa de solos Estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Colombo: Embrapa Florestas, 2008.
- SCHIPANSKI, M.E.; BARBERCHECK, M.; DOUGLAS, M.R.; FINNEY, D.M.; HAIDER, K.; KAYE, J.P.; KEMANIAN, A.R.; MORTENSEN, D.A.; RYAN, M.R.; TOOKER, J.; WHITE, C. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. **Agricultural Systems**, v.125, p.12-22, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.11.004>.
- SEPPELT, R.; DORMANN, C.F.; EPPINK, F.V.; LAUTENBACH, S.; SCHMIDT, S. A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead. **Journal of Applied Ecology**, v.48, p.630-636, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01952.x>.
- SILVA, A.H. da. **Uso e manejo do solo: impactos em atributos físicos do solo e nas perdas de água, solo e nutrientes via escoamento superficial**. 2016. 95p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SILVA, R.F.B. da; BATISTELLA, M.; MORAN, E.F. Drivers of land change: human-environment interactions and the Atlantic Forest transition in the Paraíba Valley, Brazil. **Land Use Policy**, v.58, p.133-144, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.021>.
- SPAROVEK, G.; BERNDDES, G.; KLUG, I.L.F.; BARRETTO, A.G.O.P. Brazilian agriculture and environmental legislation: status and future challenges. **Environmental Science & Technology**, v.44, p.6046-6053, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/es1007824>.
- SWINTON, S.M.; LUPI, F.; ROBERTSON, G.P.; HAMILTON, S.K. Ecosystem services and agriculture: cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. **Ecological Economics**, v.64, p.245-252, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.09.020>.
- TURETTA, A.P.D.; PRADO, R.B.; SCHULER, A.E. Serviços ambientais no Brasil: do conceito à prática. In: PRADO, R.B.; TURETTA, A.P.D.; ANDRADE, A.G. de (Org.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p.239-253.
- TURETTA, A.P.D.; TONUCCI, R.; MATTOS, L.M. de; AMARO, G.; BALIEIRO, F. de C.; PRADO, R.B.; SOUZA, H.A. de; OLIVEIRA, A.P. de. An approach to assess the potential of agroecosystems in providing environmental services. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.1051-1060, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900004>.
- WILLIAMS, D.R.; CLARK, M.; BUCHANAN, G.M.; FICETOLA, G.F.; RONDININI, C.; TILMAN, D. Proactive conservation to prevent habitat losses to agricultural expansion. **Nature Sustainability**, v.4, p.314-322, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00656-5>.
- YAHDJIAN, L.; SALA, O.E.; HAVSTAD, K.M. Rangeland ecosystem services: shifting focus from supply to reconciling supply and demand. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.13, p.44-51, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1890/140156>.
- ZAGATTO, M.R.G.; NIVA, C.C.; THOMAZINI, M.J.; BARETTA, D.; SANTOS, A.; NADOLNY, H.; CARDOSO, G.B.X.; BROWN, G.G. Soil invertebrates in different land use systems: how integrated production systems and seasonality affect soil mesofauna communities. **Journal of Agricultural Science and Technology B**, v.7, p.158-169, 2017. DOI: <https://doi.org/10.17265/2161-6264/2017.03.003>.
- ZHANG, W.; RICKETTS, T.H.; KREMEN, C.; CARNEY, K.; SWINTON, S.M. Ecosystem services and dis-services to agriculture. **Ecological Economics**, v.64, p.253-260, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024>.