



Modelos, ferramentas e instrumentos para incorporação da avaliação de serviços ecossistêmicos na tomada de decisão

Priscila Ikematsu, Bruno Portes, Bruna Fatiche Pavani, Mariana Marques, Walter Mendes, Wilson Cabral de Sousa Jr., Paulo Antonio de Almeida Sinisgalli e José Alberto Quintanilha

Introdução

O conceito de serviços ecossistêmicos tratado nos capítulos anteriores transmite uma ideia geral intuitiva e facilmente compreensível a respeito da dependência do bem-estar humano em relação aos ecossistemas (SCHWILCH et al., 2016). Entretanto, apesar dos avanços em pesquisas nas últimas décadas, a incorporação do conceito de serviços ecossistêmicos na tomada de decisões e gestão do território ainda apresenta grandes desafios, como lacunas de pesquisa sobre as relações causais entre as funções ecossistêmicas, os serviços por elas produzidos e o bem-estar humano, (DE GROOT et al., 2010; PIRES et al., 2018) e abordagens transdisciplinares que relacionem, de maneira genuína, diferentes setores sociais e formas de conhecimento para solucionar complexos desafios socioambientais (PERVOCHTCHIKOVA et al. 2019). De maneira correlata, observa-se também uma lacuna entre a ciência e a prática, predominando uma visão unidirecional de transferência de conhecimento científico baseado em evidências em Ecologia e Conservação, na qual dificilmente são considerados aspectos como a limitação da racionalidade humana, a complexidade de fatores, atores e interesses na tomada de decisão, os limites difusos entre a ciência e a prática e a pluralidade de sistemas de conhecimento e visões de mundo envolvidas nas esferas de decisão (BERTUOL-GARCIA et al., 2018). Este descompasso entre a ciência e a prática se re-

flete na dificuldade em transportar uma estrutura conceitual do mundo ordenado e simplificado dos marcos conceituais para a realidade complexa do mundo real, onde os problemas a serem enfrentados estão interligados com múltiplas questões, sistemas de conhecimento, ambientes institucionais, econômicos e políticos (JAX et al., 2018).

Frente a estes desafios, é importante que sejam desenvolvidas ferramentas de operacionalização do conceito de serviços ecossistêmicos com o objetivo de torná-los utilizáveis pelos tomadores de decisão nas diversas condições e situações do mundo real. Esse processo inclui procedimentos e métodos para tornar visíveis as complexas relações socioecológicas, de modo que seja possível compreendê-las, avaliá-las, elaborar cenários possíveis e estabelecer parâmetros que auxiliem na tomada de decisão (JAX et al., 2018). Existem diversas ferramentas que auxiliam tanto na identificação, mapeamento e avaliação dos serviços ecossistêmicos, quanto na elaboração de cenários como mudanças de uso do solo, aumento de temperatura, expansão urbana e seus possíveis impactos, utilizando de metodologias de apoio à tomada de decisão e à elaboração e monitoramento de políticas públicas.

Cabe ressaltar que operacionalizar o conceito de serviços ecossistêmicos não significa que há uma solução única e um esquema simples de aplicação, mas uma variedade de ferramentas e métodos disponíveis que podem levar a diversas rotas de soluções para os problemas a serem enfrentados, de acordo com seus contextos ecológicos, sociais e políticos específicos (JAX et al., 2018). Além disso, a escolha dos instrumentos e metodologias deve ser ajustada às condições de disponibilidade de dados, de capacidade técnica e de atuação institucional dos diversos órgãos de planejamento e gestão do território (GRÊT-REGAMEY et al., 2017).

A modelagem espacial de serviços ecossistêmicos é um campo de pesquisa emergente (OCHOA & URBINA-CARDONA, 2017) e possibilita o desenvolvimento de métodos inovadores para construção de cenários, análise de serviços ecossistêmicos e práticas de gestão, as quais têm grande potencial para criar soluções personalizadas que atendam às necessidades dos tomadores de decisão no planejamento do uso da terra e formulação de políticas públicas.

A Figura 1 apresenta um framework conceitual sobre a inclusão dos serviços ecossistêmicos em políticas públicas, destacando cinco grandes

etapas. A primeira etapa “Selecionar e analisar os serviços ecossistêmicos” compreende o “modelo de cascata” adaptado para fornecer uma estrutura conceitual na compreensão do fluxo de produtos do ecossistema até as pessoas (POTSCHIN & HAINES-YOUNG, 2016). A cascata inicia com um conjunto de estruturas biofísicas e processos ecológicos que encontramos em uma área. Este conjunto sustenta as funções ecossistêmicas, que muitas vezes são consideradas serviços intermediários ou de suporte. Essas funções geram os serviços ecossistêmicos finais, que são considerados potencialmente úteis para as pessoas através da provisão de bens e benefícios. Por fim, um valor (monetário ou não) pode ser atribuído a essas contribuições do ecossistema para o bem-estar humano.

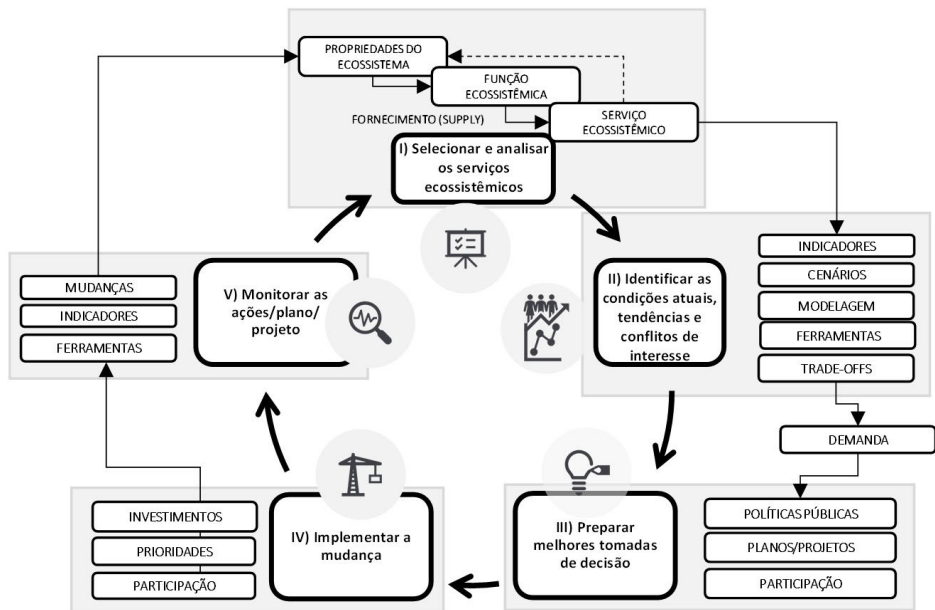


Figura 1 Inclusão dos serviços ecossistêmicos no ciclo de planejamento de políticas públicas de conservação para redução dos riscos associados à perda dos ecossistemas. Fonte: Autora Priscila Ikematsu.

Entendendo-se que os serviços ecossistêmicos são os produtos dos ecossistemas (naturais, seminaturais ou altamente modificados) que são considerados potencialmente úteis para as pessoas, sugere-se utilizar a *Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES) para auxiliar a identificação desses serviços (HAINES-YOUNG & POTSCHIN,

2018). Apesar da maioria das 90 classes ser identificada na área da Macrometrópole Paulista, por limitações metodológicas ou na disponibilidade de dados, as pesquisas tendem a analisar apenas uma pequena parcela dos serviços, tais como: água de superfície para beber ou usada como fonte de energia, regulação da condição química da água doce por processos vivos, regulação da composição química da atmosfera e controle de taxas de erosão (FERREIRA et al, 2019; PAVANI et al., 2020).

A Etapa 2 “Identificar as condições atuais, tendências e conflitos de interesse” visa analisar indicadores para a compreensão do *status quo* da relação entre os ecossistemas e as pessoas, delimitando possíveis cenários. Diferentes métodos de modelagem (social, econômica, ambiental, ecológica, entre outras) são acoplados em ferramentas usadas para avaliar, mapear e valorar os serviços ecossistêmicos. A utilização desses instrumentos visa explorar como as mudanças nos ecossistemas podem levar a mudanças nos fluxos dos bens e benefícios para as pessoas, avaliando os conflitos de interesse e *trade-offs*.

Os resultados encontrados através dos modelos e ferramentas devem ser utilizados na etapa seguinte: “Preparar melhores tomadas de decisão”. Esses resultados devem ser consolidados em planos e projetos com escopo bem definido para atingir os objetivos propostos nas políticas públicas de interesse. O envolvimento de diferentes atores sociais na discussão e na tomada de decisão traz celeridade e eficiência para essas políticas públicas participativas.

A quarta etapa “Implementar a mudança” é essencial para otimizar a alocação de investimentos e dar segurança ao retorno esperado. Uma das principais ações desta etapa é a priorização de temas e áreas de interesse. Da mesma maneira que a etapa anterior, a participação da sociedade neste processo é fundamental para garantir que além de escolhas corretas na priorização, o processo de implementação desta mudança realmente aconteça da maneira esperada.

A última etapa “Monitorar ações, plano e projeto” garante a aplicação das ações e mudanças promovidas ao longo do tempo, e consequentemente, também garantem a manutenção e/ou a ampliação na provisão dos serviços ecossistêmicos. O monitoramento trará dados empíricos para consolidar os indicadores e aprimorar as ferramentas em níveis adequados ao contexto espacial e à escala de informação.

Essas etapas são fundamentais para garantir a incorporação dos serviços ecossistêmicos no ciclo de planejamento de políticas públicas. As ações descritas neste fluxograma tendem a minimizar as perdas e maximizar os ganhos nos problemas e questões sobre uso e ocupação do solo, fornecimento de serviços ecossistêmicos e, conseqüentemente, sobre o bem-estar humano.

Os elementos discutidos neste capítulo estão inseridos na Etapa 2, principalmente no levantamento de modelos e ferramentas de avaliação de serviços ecossistêmicos que podem ser utilizados como instrumentos para a tomada de decisão. A ideia, mais do que apresentar detalhes e resultados ou uma exaustiva revisão das ferramentas e metodologias existentes, é identificar elementos e apresentá-los como um caminho eficiente e teoricamente justificável para a inserção dos serviços ecossistêmicos nas políticas públicas de preservação, conservação e uso sustentável de ecossistemas, biodiversidade e florestas.

Este capítulo organiza-se nos seguintes tópicos: 1. Modelagem e cenários como instrumentos de planejamento e gestão; 2. Ferramentas para análise de serviços ecossistêmicos; 3. Aplicabilidade e restrições para a modelagem de serviços ecossistêmicos na Macrometrópole Paulista; 4. Considerações finais.

Modelagem e cenários como instrumentos de planejamento e gestão

A construção de cenários objetiva examinar futuros plausíveis, possíveis, prováveis e/ou preferíveis para um ou mais componentes de um sistema, baseados em um conjunto coerente e internamente consistente de pressupostos sobre vetores de mudanças, incertezas, incógnitas e relações-chave (CARPENTER et al., 2005; HERNANDEZ et al., 2010; IPBES, 2016; KRÖGER & SCHÄFER, 2016; LAMBIN & GEIST, 2006; PETERSON et al., 2003).

A construção desses cenários representa um valioso esforço de compreensão das relações socioecológicas no território, particularmente quando os resultados ecológicos são altamente dependentes de fatores indiretos como crescimento econômico e demográfico (CARPENTER, 2005). Nos estudos de serviços ecossistêmicos, a análise de cenários foi aplicada com sucesso em nível local, bem como em avaliações no âmbito nacio-

nal, regional e global (BURKHARD & MAES, 2017) e o número de trabalhos nessa temática vem aumentando (HASEGAWA et al., 2018).

A construção de cenários é um processo complexo e requer narrativas plausíveis, relacionáveis e internamente consistentes de partes interessadas que são traduzidas e depois mapeadas por meio de uma variedade de métodos disponíveis (BERG et al., 2016). O relatório da IPBES (2016) reforça que a construção de cenários idealmente deve incluir o engajamento ativo de diferentes atores por meio de processos participativos, deliberação entre painéis de especialistas e simulações quantitativas por modelagem.

Na área de abrangência da Macrometrópole Paulista, Ferreira et al. (2019) modelaram seis parâmetros hidrológicos na Bacia do Rio Tietê usando o *WaterWorld Policy Support System*, simulando a linha de base atual e seis cenários futuros. Os resultados indicam que a mudança climática deve impactar os serviços ecossistêmicos de purificação (regulação da condição química da água doce por processos vivos) e provisão de água (água de superfície para beber ou usada como fonte de energia), principalmente em áreas urbanas. Por outro lado, um aumento da cobertura florestal tem potencial de amortecer esses impactos negativos na megalópole de São Paulo. Como as áreas urbanas não são elegíveis para reflorestamento massivo, este não será suficiente para restaurar todos os parâmetros hidrológicos na bacia, sendo necessário complementar com práticas agrícolas sustentáveis. Desse modo, o estudo traz informações relevantes para políticas e iniciativas voltadas ao reflorestamento e restauração florestal, como o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa, o Código Florestal Brasileiro (Lei Federal nº 12.651/2012), o Pacto Mata Atlântica e os Programas de Pagamentos por Serviços Ambientais.

Com o objetivo de analisar o risco às secas no contexto das mudanças climáticas e as respostas políticas para o território da Macrometrópole, Campello Torres et al. (2021) utilizaram o Índice de Vulnerabilidade a Desastres Naturais relacionados a Secas (IVDNS) para identificar e selecionar os municípios mais vulneráveis nesse território. Apesar de terem capacidades positivas para responder às mudanças climáticas, os resultados indicam que os municípios selecionados estão longe de avançar do *status quo* ou de tomar as ações necessárias para enfrentar futuros desafios em um cenário de emergência climática, onde existe uma necessida-

de maior de articulação com outros níveis de governança. De acordo com os autores, a insuficiente integração dos mapeamentos de risco geotécnico em planos diretores municipais, a pouca representatividade de processos participativos na definição de prioridades na gestão de riscos e desastres e a falta de diálogo entre as instituições técnicas e políticas, têm impedido o gerenciamento municipal adequado das mudanças climáticas. Nesse contexto, ao indicar as áreas onde a vulnerabilidade a secas e desastres naturais é maior, o trabalho qualifica o serviço ecossistêmico de regulação das condições físicas, químicas e biológicas, contribuindo para orientar os tomadores de decisão no desenvolvimento de estratégias para adaptação e resiliência às mudanças climáticas na Macrometrópole Paulista, as quais são urgentes nos municípios estudados, e, também, ao cumprimento das metas do Acordo de Paris.

Outra análise relevante foi realizada por Pavani et al. (2018) que quantificaram o valor do balanço de carbono em três cenários de mudança do uso da terra no Litoral Norte da Macrometrópole Paulista realizada com os softwares Dinamica EGO e InVEST (módulo Carbon). O estudo indicou maior perda de carbono no cenário influenciado pela logística de infraestrutura, exploração de óleo-gás e pressão sobre os ambientes naturais, com perdas monetárias da ordem de US\$90 milhões em 20 anos. Os resultados claramente mostram alterações no serviço ecossistêmico de regulação da composição química da atmosfera e podem subsidiar políticas públicas para o gerenciamento sustentável dos sistemas costeiros, para adaptação às mudanças climáticas e para conservação de ambientes naturais.

Como pode ser observado nos estudos citados acima, os cenários são projetados para entender as mudanças nos ecossistemas e, consequentemente, na oferta de serviços ecossistêmicos, estudando como reduzir possíveis impactos e auxiliar na tomada de decisão. A formulação de políticas públicas também pode ser beneficiada por essa abordagem, promovendo a conscientização e o envolvimento dos fornecedores e consumidores desses serviços. Na implementação de políticas, abordagens de cenários são frequentemente usadas para ajudar a identificar quais atividades serão permitidas ou incentivadas em partes específicas da paisagem para atingir diferentes objetivos, como proteção ambiental, produtividade agrícola, desenvolvimento econômico e manutenção da biodiversidade (IPBES, 2016).

Assim, a previsão de mudanças futuras no fornecimento de serviços ecossistêmicos sob vários cenários representa um importante subsídio ao planejamento do território, pois podem indicar áreas importantes que necessitam de ações de restauração ou planos de conservação de acordo com as prioridades da região. O desafio é encontrar um caminho a partir dos diversos cenários que, na medida do possível, seja capaz de fornecer um portfólio mais amplo de serviços e, ainda, garanta a continuidade no seu fornecimento. Para isso, a escolha da ferramenta certa é fundamental para que os resultados melhorem, de fato, o entendimento e caminhos dos objetivos almejados.

Ferramentas para análise de serviços ecossistêmicos

Para a avaliação de serviços ecossistêmicos em diferentes cenários, Burkhard et al. (2018); Dunford et al. (2017) e Harrison et al. (2018) mencionam métodos biofísicos para mapear e modelar os ecossistemas; métodos socioculturais para entender preferências de serviços ecossistêmicos ou valores sociais; e técnicas monetárias para estimar valores econômicos. Grêt-Regamey et al. (2015) e Turner et al. (2016) acrescentam as ferramentas computadorizadas, como Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sensoriamento remoto e modelos de uso do solo, hidrológicos e ecológicos.

Alguns portais e documentos técnicos (CIASCA, 2014; SNELL, 2016; NEUGARTEN et al., 2018) sistematizam um banco de dados com ampla gama de métodos, ferramentas e fontes. É possível selecionar aquela mais aderente ao objetivo do estudo, tipo de abordagem a ser utilizada (biofísica, monetária, social, etc.) e categoria de serviços ecossistêmicos a serem avaliados (provisão, regulação, culturais e de suporte).

As ferramentas podem ser utilizadas para análise (espacial ou não) e para a valoração dos serviços (ou ambos) considerando fatores sociais, ambientais e econômicos, em diversas escalas (nacional, regional, local). A maioria utiliza mapas como fontes de informação e produz mapas como saídas. Outras permitem a entrada de tabelas e dados qualitativos (entrevistas, grupos focais, *surveys*), resultando em relatórios, gráficos e diagramas (IKEMATSU & QUINTANILHA, 2020). Esforços têm sido empreendidos para conceber ferramentas que combinam sistemas de indicadores quantitativos, recursos de mapeamento espacialmente explícitos e percepção

qualitativa das partes interessadas de forma complementar (INOSTROZA et al., 2017).

Desse modo, os produtos advindos da sua aplicação podem facilitar a visualização da situação atual e futura dos serviços ecossistêmicos aos tomadores de decisão, por meio da representação cartográfica (mapas) e visual (diagramas), informando a situação atual e os impactos e as implicações de diferentes ações e políticas para a economia e para o bem estar humano e ambiental, de maneira integrada. A definição de áreas para restauração ou enriquecimento florestal, a proposição de corredores ecológicos, oportunidades no mercado de créditos de carbono e de pagamentos por serviços ambientais são alguns exemplos de ações que podem ser subsidiadas pelos produtos gerados.

Algumas ferramentas são de uso simplificado e rápido, conduzidas por planilhas práticas para a realização de avaliação qualitativa e quantitativa dos serviços ecossistêmicos, bem como uma análise de indicadores, conselhos sobre questões relevantes e um compêndio de informações sobre o tema. Essas ferramentas auxiliam na avaliação dos benefícios que as pessoas recebem da natureza, gerando informações para influenciar a tomada de decisão em determinados locais. Neste contexto, pode-se citar *Ecosystem Services Toolkit (EST)*, *Protected Areas Benefits Assessment Tool (PA-BAT)* e *Toolkit for Ecosystem Service Site-based Assessment (TESSA)*.

Outras ferramentas requerem habilidades em softwares e sistemas de informação georreferenciada (SIG), utilizando mapas e informações geoespaciais para identificar, avaliar e mapear os serviços ecossistêmicos. A web-ferramenta *Co\$ting Nature (C\$N)* tem objetivo de avaliar espacialmente os impactos de intervenções humanas nos serviços ecossistêmicos, fornecendo um índice relativo para auxiliar na priorização de conservação e avaliação de benefícios, pressões e ameaças. Para valores sociais atribuídos aos serviços ecossistêmicos culturais, como valores estéticos ou recreativos, o *Social Values for Ecosystem Services (SolVES)* combina a alocação de pontos de pesquisas com métricas e intensidades de valores. Para avaliação dos serviços hidrológicos em condições atuais e em cenários de uso do solo e mudanças climáticas, a *WaterWorld (WW)* é uma web-ferramenta que fornece resultados biofísicos quantitativos e índices relativos.

Além da experiência em SIG, algumas ferramentas também requerem habilidade em modelagem e até treinamento para garantir a correta mo-

delagem espacial de serviços ecossistêmicos. Dois exemplos são o *Artificial Intelligence for Ecosystem Services (ARIES)* e o *Multiscale Integrated Models of Ecosystem Services (MIMES)*. Ambas as plataformas foram projetadas para integrar diferentes modelos ecológicos e econômicos na modelagem de serviços ecossistêmicos. Essas plataformas incluem avaliação por cenários que podem ser utilizados na otimização de programas de Pagamentos por Serviços Ecossistêmicos e no planejamento de políticas geoespaciais.

Uma das ferramentas mais utilizadas internacionalmente é o *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST)*, desenvolvido pelo *Natural Capital Project* da Universidade de Stanford. Apesar de ter código aberto, o software possui uma interface amigável que auxilia na utilização do conjunto de modelos para mapeamento e quantificação de serviços ecossistêmicos em termos biofísicos e econômicos em diferentes cenários. Outras ferramentas são o *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)*, *Land Utilisation and Capability Indicator (LUCI)* e *Resource Investment Optimization System model (RIOS)*.

No contexto do projeto MacroAmb, alguns estudos aplicaram o *InVEST* e suas funções de produção ecológica para gerar previsões espacialmente explícitas da oferta de serviços ecossistêmicos com base em mapeamentos de usos do solo e cobertura vegetal, atributos biofísicos correspondentes a cada uso e dados adicionais representando condições ambientais como clima, solo e topografia. Em uma dessas análises, Pavani, Ikematsu e Ribeiro (2020) avaliaram dois indicadores de serviços ecossistêmicos: sequestro de carbono e retenção de sedimentos a partir do software *InVEST*. Os resultados preliminares indicaram um grande armazenamento de carbono na região da Macrometrópole Paulista, porém essa capacidade se mostrou reduzida em cenários de aumento de temperatura decorrentes do aquecimento global. Já a análise de retenção de sedimentos indicou que o controle da erosão pode auxiliar na quantificação da economia em tratamento de água devido à redução da turbidez, atrelada à melhora do uso do solo na bacia hidrográfica. As autoras destacam a importância de incentivar os agricultores a adotar o sistema agroflorestal, por meio de pagamentos por serviços ambientais, para o restabelecimento dos benefícios proporcionados pelo ecossistema.

Em outra escala, De Abreu Marques (2018) aplicou o *InVEST* na Bacia da Represa do Jaguari, localizada no Vale do Paraíba para avaliação do

serviço ecossistêmico de provisão de água. Esta bacia pertence à rede integrada de reservatórios do Sistema Cantareira, que atende a demanda hídrica da Macrometrópole de São Paulo. O cenário analisado considera o reflorestamento total da Área de Preservação Permanente de rios e córregos na Bacia com vegetação natural e com sistemas agrofloretais. Os resultados indicaram a importância da utilização da infraestrutura natural e de soluções baseadas na natureza, na forma de áreas vegetadas, no balanço hídrico e na resiliência hídrica da bacia.

Pavani et al. (2020) avaliaram o benefício de controle da erosão e a redução da quantidade de sedimentos em suspensão na água em 24 bacias hidrográficas, sob influência da Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Paraíba do Sul também por meio do *InVEST*. Para estimar a proteção dos recursos hídricos por meio do reflorestamento, o cenário atual foi comparado a um cenário hipotético, no qual pastagens degradadas são substituídas por florestas. Assim, ao debelar a erosão do solo pode reduzir cerca de 40 t.ha⁻¹.ano⁻¹, e o reflorestamento poderia evitar gastos com tratamento de água, disposição de lodo e dragagem em torno de US\$ 7,8 milhões por ano. O trabalho contribui sobremaneira na discussão de programas e iniciativas de Pagamentos por Serviços Ambientais hídricos e restauração florestal com objetivos de incentivos econômicos, de forma a evitar o esgotamento dos recursos hídricos e desigualdades no acesso à água.

Aplicabilidade e restrições para a modelagem de serviços ecossistêmicos na Macrometrópole Paulista

A vantagem dos modelos preditivos é a possibilidade de aplicação em diferentes paisagens a partir da troca de dados iniciais (locais ou regionais), principalmente de grandes extensões territoriais, como é o caso da Macrometrópole Paulista. O emprego de ferramentas computacionais com interface cartográfica (mapas) e visual (diagramas) facilita a representação da situação atual e futura dos serviços ecossistêmicos aos tomadores de decisão e demais atores.

Os modelos podem ser aplicados em diversas escalas, podendo incluir tanto extensão da Macrometrópole Paulista e sua complexa heterogeneidade territorial, quanto porções menores do território, como as regiões metropolitanas, aglomerações urbanas ou bacias hidrográficas.

Como coexistem áreas de alto e baixo dinamismo, com potencialidades diferenciadas de desenvolvimento econômico, social e urbano em suas distintas unidades regionais, bem como no interior delas (CUNHA et al., 2013; GALVÃO, 2017; NEGREIROS et al., 2015), os resultados encontrados estão atrelados às condicionantes iniciais, às dinâmicas adotadas e as próprias restrições do modelo. Entretanto, representam uma importante contribuição para mostrar as diversas possibilidades e quais caminhos podem ser traçados a partir destes resultados.

Entre as dificuldades para a elaboração de cenários e da modelagem ambiental estão o pré-processamento de dados, que exige grandes esforços de pesquisa e adaptação dos dados de entrada, e a dinâmica não linear entre serviços ecossistêmicos em diferentes trajetórias, impulsionados por fatores biofísicos e decisões de gestão. Além disso, esbarra-se na falta de elementos para uma análise na escala macrometropolitana e na dificuldade de modelar as complexas relações que engendram *trade-offs* entre o fornecimento de serviços ecossistêmicos e as ações previstas para a região. As incertezas associadas à modelagem ambiental, bem como a impossibilidade de contemplar todas as dimensões, interações, variações e fatores envolvidos nas diferentes unidades físicas ao longo do tempo e espaço nas simulações (CAVENDER-BARES et al., 2015; DENG & GIBSON, 2016), também fazem parte do rol limitações para a modelagem de serviços ecossistêmicos na Macrometrópole Paulista.

Alguns modelos podem ser operados com limites administrativos (CAMPELLO TORRES et al., 2021; PAVANI et al., 2018) e outros necessitam de bacias hidrográficas como recorte espacial (DE ABREU MARQUES, 2018; FERREIRA et al., 2019; PAVANI et al., 2020). A escolha de qual unidade de análise será adotada para uma análise integrada e de clusters espaciais de serviços ecossistêmicos também é essencial nos estudos de modelagem.

Felizmente, caminhamos para uma realidade marcada pela evolução das ferramentas e técnicas de processamento e pela disponibilização de dados de entrada com maior qualidade e de mais fácil acesso. O uso e cobertura da terra, por exemplo, uma das informações essenciais na modelagem de serviços ecossistêmicos e elaboração de cenários, depende do processo de classificação adotado e da velocidade das dinâmicas de transformação do território. O Projeto Mapbiomas, que mapeou o uso e cobertura do solo para todo o Brasil, foi elaborado por meio do *Google*

Earth Engine (GEE), uma avançada plataforma de processamento geoespacial baseada em nuvem que permite análises de dados ambientais em escala planetária e macro-regionais de uma maneira rápida e otimizada. O GEE possui, ainda, uma base catalográfica de vários *petabytes* de imagens de satélite e de algoritmos na nuvem, ou seja, o usuário pode realizar diversos processamentos sem precisar estocar em sua máquina os dados de entrada e saída (GORELICK et al., 2017).

Cabe mencionar, também, que muitas das ferramentas para a modelagem de serviços ecossistêmicos são periodicamente atualizadas de forma a incorporar novas variáveis e novas demandas. Um exemplo é o Urban InVEST que está sendo desenvolvido pelo Natural Capital em parceria com governos municipais e líderes de cidades nos Estados Unidos e na Ásia-Pacífico, cujos estudos estão apoiando avaliações ecológicas urbanas nas principais cidades chinesas e a avaliação dos co-benefícios da infraestrutura verde em Paris, França e várias cidades dos EUA (HAMEL et al., 2021).

Apesar dos avanços tecnológicos e de uma relativa adoção dessas ferramentas na tomada de decisão, é preciso avançar na relação unilateral entre ciência e prática de modo a integrar diferentes fontes de conhecimento local a respeito dos serviços ecossistêmicos e suas relações com diferentes setores da sociedade para avaliar com maior precisão e complexidade as relações e problemas socioambientais a serem enfrentados (BERTUOL-GARCIA et al. 2018) Uma abordagem mais participativa (“valor para quem?” e “valor a partir de quando?”) aumenta a credibilidade, a relevância e a legitimidade do processo, fornece insumos para ferramentas de avaliação, apoia a interpretação dos resultados iniciais, cria um entendimento mútuo do problema e de como usar os resultados para subsidiar as decisões (RUCKELSHAUS et al., 2015; DUNFORD et al., 2017). A inclusão da visão dos diferentes atores sociais em modelagem não é trivial, dado que os valores não são estáticos e variam dependendo de quais grupos atribuem valor aos serviços ecossistêmicos (DUNFORD et al., 2017) em resposta a mudanças ambientais, socioeconômicas ou fatores políticos. Além disso, a inclusão das percepções dos atores nos modelos ainda é ponto a ser mais apropriado e desenvolvido (AMAZONAS et al., 2021).

Desse modo, há a necessidade de estimular uma participação mais ativa da sociedade no debate dos problemas, objetivos e soluções que influenciam seus destinos, assim como investir em processos educativos

e de comunicação da importância dos serviços ecossistêmicos para as lideranças atuais e sociedade em geral. O envolvimento dos diversos atores sociais deve ser feito, como mostrado na Figura 1, durante todo o processo de formulação de políticas públicas, de forma a construir e reconstruir novas leituras, interpretações e proposições de soluções para a Macrometrópole Paulista, e outros recortes espaciais semelhantes.

Apesar do nível de incerteza que permeia qualquer estudo envolvendo modelagem ambiental, os estudos mostram que a escolha de ferramentas de análises espaciais adequadas, adotadas conjuntamente com técnicas estatísticas e indicadores, podem ajudar a responder perguntas sobre os impactos potenciais das decisões políticas no futuro nos serviços ecossistêmicos, bem como apoiar a formulação e implementação de ações de restauração, conservação e uso sustentável baseadas em fundamentos científicos. Assim, gerar conhecimento sobre a situação atual e futura dos serviços fornecidos pelos ecossistemas é fundamental para o planejamento integrado desses mesmos ecossistemas e paisagens associadas, já que diferentes estratégias e decisões sobre o uso e cobertura da terra geram impactos significativos sobre a oferta e a demanda de serviços ecossistêmicos.

Considerações finais

Este capítulo descreveu as rotas metodológicas para a integração do conceito de serviços ecossistêmicos em processos de tomada de decisão, apresentando alguns estudos de caso para ilustrar essa abordagem em diferentes contextos de políticas públicas da Macrometrópole Paulista, como recuperação e conservação florestal, adaptação às mudanças climáticas, proteção de sistemas costeiros, bacias hidrográficas e ambientes naturais. Uma série de ferramentas e instrumentos disponíveis para apoiar essa integração foi apresentada. Algumas requerem habilidades em softwares e sistema de informações geográficas, utilizando mapas e informações geoespaciais para identificar, avaliar e mapear serviços ecossistêmicos; mas também existem softwares simples e rápidos de usar. O Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST), um dos softwares de código aberto mais utilizados nesse sentido, foi aplicado para gerar previsões espacialmente explícitas de prestação de serviços ecossis-

têmicos (sequestro de carbono, retenção de sedimentos e controle de erosão) com base em mapeamentos de uso da terra e cobertura vegetal, atributos biofísicos e dados adicionais representando condições ambientais como clima, solo e topografia no contexto macrometropolitano.

Constata-se que o uso de modelos em áreas de grandes extensões territoriais, como a Macrometrópole Paulista, é útil aos tomadores de decisão e demais interessados. Algumas limitações ainda permanecem, como o pré-processamento dos dados, a dinâmica não linear entre os serviços ecossistêmicos, as relações complexas que ocorrem na escala macrometropolitana e as incertezas associadas à modelagem ambiental no tempo e no espaço. Felizmente, novas tecnologias e bancos de dados livres estão disponíveis e podem ajudar a enfrentar esses desafios, juntamente com o engajamento de diferentes stakeholders por meio de processos participativos em simulações quantitativas por modelagem. Apesar da heterogeneidade do território da Macrometrópole Paulista, essa abordagem representa uma importante contribuição para mostrar as diferentes possibilidades e caminhos que podem ser traçados a partir desses resultados para um futuro mais sustentável na maior aglomeração urbana do Brasil.

Agradecimentos – Os autores agradecem o apoio recebido da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) Processo nº 2015/03804-9, nº 2018/16781-5 e bolsa 2019/22940-1; e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Bolsa PQ Processo nº 314096/2020-5 e nº 305188/2020-8.

Referências

AMAZONAS, I.; SCHIMITD, A.; ZANETTI, V.; FARLEY, J.; SINISGALLI, P.A.A. A participatory modeling experience with young farmers: assessing the sustainability of family farmers in Brazil. **Research, Society and Development**, v. 10, p. 1-14, 2021

BERG, C.; ROGERS, S.; MINEAU, M. Building scenarios for ecosystem services tools: Developing a methodology for efficient engagement with expert stakeholders. **Futures**, v. 81, p. 68-80, 2016.

BERTUOL-GARCIA, D.; MORSELLO, C.; EL-HANI, C. N.; et al. A conceptual framework for understanding the perspectives on the causes of the science-practice gap in ecology and conservation. **Biol. Rev.** 93: 1032-1055, 2018.

BURKHARD, B. et al. An operational framework for integrated Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services (MAES). **One Ecosystem**, v. 3, p. e22831, 2018.

BURKHARD, B.; MAES, J. **Mapping Ecosystem Services**. Sofia: Pensoft Publishers, 2017. v. 14

CAMPELLO TORRES, P.H.; GONÇALVES, D.A.; MENDES DE ALMEIDA COLLAÇO, F.; LOPES DOS SANTOS, K.; CANIL, K.; CABRAL DE SOUSA JÚNIOR, W.; JACOBI, P.R. **Vulnerability of the São Paulo Macro Metropolis to Droughts and Natural Disasters: Local to Regional Climate Risk Assessments and Policy Responses**. *Sustainability* 2021, 13, 114. <https://doi.org/10.3390/su13010114>.

CARPENTER, S. R. et al. **Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios**. MEA, 2005.

CAVENDER-BARES, J. et al. A sustainability framework for assessing trade-offs in ecosystem services. **Ecology and Society**, v. 20, n. 1, 2015.

CIASCA, B.S. **Estado da arte de metodologias e ferramentas voluntárias de compensação pelo setor privado**. Rio de Janeiro: Funbio, 2014. 72 p. : il. ISBN: 978-85-89368-16-2

CUNHA, J. M. P. DA et al. A mobilidade pendular na Macrometrópole Paulista: diferenciação e complementaridade socioespacial. **Cadernos MetrÓpole**, v. 15, n. 30, p. 433–459, dez. 2013.

DE ABREU MARQUES, M. G. Comparação de balanço hídrico na restauração de APP com mata nativa e sistema agroflorestal: estudo de caso. 2018. 75 f. **Dissertação**. Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

DE GROOT, R. S. et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. **Ecological Complexity**, v. 7, Issue 3, p. 260-272, 2010.

DENG, X.; LI, Z.; GIBSON, J. A review on trade-off analysis of ecosystem services for sustainable land-use management. **Journal of Geographical Sciences**, v. 26, n. 7, p. 953–968, 2016.

DUNFORD, R. W.; HARRISON, P. A.; BAGSTAD, K. J. **Computer modelling for ecosystem service assessment**. In: *Mapping Ecosystem Services*. Bulgaria: Benjamin Burkhard & Joachim Maes, 2017.

FERREIRA, P. et al. Can forests buffer negative impacts of land-use and climate changes on water ecosystem services? The case of a Brazilian megalopolis. **Science of The Total Environment**, v. 685, p. 248–258, 2019.

GALVÃO, R. F. P. O rural na urbanização paulista em contexto macrometropolitano. **Tese** (Doutorado em Ciências) apresentada à Universidade de São Paulo, 2017.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, dez. 2017.

GRÊT-REGAMEY, A. et al. A tiered approach for mapping ecosystem services. **Ecosystem Services**, v. 13, p. 16–27, 2015.

GRÊT-REGAMEY, A. et al. Review of decision support tools to operationalize the ecosystem services concept. **Ecosystem Services**, v. 26, p. 306-315, 2017.

HAINES-YOUNG, R.; M.B. POTSCHIN (2018): Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure. Available from www.cices.eu.

HAMEL, P. et al. Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software. **Npj Urban Sustainability**, v. 1, 25, 2021. <https://doi.org/10.1038/s42949-021-00027-9>

HARRISON, P. A. et al. Selecting methods for ecosystem service assessment: A decision tree approach. **Ecosystem Services**, v. 29, p. 481–498, 2018.

HASEGAWA, Y.; OKABE, K.; TAKI, H. A scenario approach for ecosystem-service changes. **Futures**, v. 96, p. 23–31, 2018.

HERNANDEZ, M. et al. The Use of Scenario Analysis to Assess Water Ecosystem Services in Response to Future Land Use Change in the Willamette River Basin , Oregon. Chapter 5. Liotta, P.; Kepner, W.; Lancaster, J.; Mouat, D. (ed.), *Achieving Environmental Security: Ecosystem Services and Human Welfare*. **IOS Press**, Amsterdam, Netherlands, 69:265-268, (2010).

IKEMATSU, P.; QUINTANILHA, J. A. A review of ecosystems services trade-offs, synergies and scenarios modelling for policy development support. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 54, 22 dez. 2020.

INOSTROZA, L; KÖNIG, H.J.; PICKARD, B.; ZHEN, L. Putting ecosystem services into practice: Trade-off assessment tools, indicators and decision support systems. **Ecosystem Services**, 2017; 26:303–305.

IPBES - INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES. **The methodological assessment report on scenarios and models of biodiversity and ecosystem services**. IPBES, 2016.

JAX, K. et al. Handling a messy world: Lessons learned when trying to make the ecosystem services concept operational. **Ecosystem Services**, v. 29, p. 415-427, 2018.

KRÖGER, M.; SCHÄFER, M. Scenario development as a tool for interdisciplinary integration processes in sustainable land use research. **Futures**, v. 84, p. 64–81, 2016.

LAMBIN, E. F.; GEIST, H. **Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts**. [s.l.] Springer, 2006.

NEGREIROS, R.; SANTOS, S. M. M. DOS; MIRANDA, Z. A. I. Nova escala de planejamento, investimento e governança na macrometrópole paulista. **Revista Iberoamericana de Urbanismo**, v. 12, n. ano 7, p. 121–136, 2015.

NEUGARTEN, R.A. et al. **Tools for measuring, modelling, and valuing ecosystem services: Guidance for Key Biodiversity Areas, natural World Heritage Sites, and protected areas**. Gland, Switzerland: IUCN, 2018. 70pp.

OCHOA, V., URBINA-CARDONA, N. Tools for spatially modeling ecosystem services: Publication trends, conceptual reflections and future challenges. **Ecosystem Services**, 26, 2017. p.155-169.

PAVANI, B. F. et al. Estimating and valuing the carbon release in scenarios of land-use and climate changes in a Brazilian coastal area. **Journal of Environmental Management**, v. 226, p. 416–427, 2018.

PAVANI, B. F. et al. Payments for Ecosystem Services to Water Resources Protection In Paraíba do Sul Environmental Protection Area. **Ambiente & Sociedade**, v. 23, p. e01341, 2020.

PAVANI, B. F.; IKEMATSU, P.; RIBEIRO, A. C. G. . Mapeamento de indicadores de serviços ecossistêmicos da Macrometrópole Paulista. **Diálogos Socioambientais na Macrometrópole Paulista**, v. 3, n. 07, p. 12-15, 15 jul. 2020.

PETERSON, G. D.; CUMMING, G. S.; CARPENTER, S. R. Scenario Planning: a Tool for Conservation in an Uncertain World. **Conservation Biology**, v. 17, n. 2, p. 9, 2003.

PERVOCHTCHIKOVA, M.; LA MORA-DE, D.; LA MORA, G.; et al. Systematic review of integrated studies on functional and thematic ecosystem services in Latin America, 1992–2017. **Ecosystem Services**. v.36, 2019

PIRES, P. F. A.; AMARAL, A. G.; PADGURSCHI, M. C. G.; JOLY, C. A.; SCARANO, F. R.. Biodiversity research still falls short of creating links with ecosystem services and human well-being in a global hotspot. **Ecosystem Services**, v. 34, p.68-73, 2018.

POTSCHIN, M. AND HAINES-YOUNG, R. (2016): **Defining and measuring ecosystem services**. In: Potschin, M., Haines-Young, R., Fish, R. and Turner, R.K. (eds) Routledge Handbook of Ecosystem Services. Routledge, London and New York, pp 25-44.

RUCKELSHAUS, M. et al. Notes from the field: Lessons learned from using ecosystem service approaches to inform real-world decisions. **Ecological Economics**, v. 115, p. 11–21, 2015.

SCHWILCH, G. et al. Operationalizing ecosystem services for the mitigation of soil threats: A proposed framework. **Ecological Indicators**, v. 67, p. 586-597, 2016.

SNELL, M. **Review of Ecosystem Services Valuation Tools**. 2016. Disponível em: <https://frenchmanbaypartners.org/wp-content/uploads/2016/09/Review-of-Ecosystem-Services-Valuation-Tools.pdf>. Acesso em: Fev. 2021.

TURNER, K. G. et al. A review of methods, data, and models to assess changes in the value of ecosystem services from land degradation and restoration. **Ecological Modelling**, v. 319, p. 190–207, 2016.