

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
CENTRO DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE - CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO AMBIENTE E
SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA - PPGCASA

RICARDO TAKASHI KUWANO

**OS SERVIÇOS AMBIENTAIS PRESTADOS PELA FLORESTA AMAZÔNICA E A
PROPOSTA DE REMUNERAÇÃO FINANCEIRA PARA A MANUTENÇÃO DA
FLORESTA EM PÉ PELOS ESTADOS NACIONAIS NÃO AMAZÔNICOS**

MANAUS
2026

RICARDO TAKASHI KUWANO

**OS SERVIÇOS AMBIENTAIS PRESTADOS PELA FLORESTA AMAZÔNICA E A
PROPOSTA DE REMUNERAÇÃO FINANCEIRA PARA A MANUTENÇÃO DA
FLORESTA EM PÉ PELOS ESTADOS NACIONAIS NÃO AMAZÔNICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na
Amazônia – PPGCASA como exigência para
obtenção do título em nível de Doutorado, sob a
orientação do Prof. Dr. Valmir César Pozzetti

**MANAUS-AM
2026**

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- K97s Kuwano, Ricardo Takashi
- Os serviços ambientais prestados pela Floresta Amazônica e a proposta de remuneração financeira para manutenção da floresta em pé pelos estados nacionais não amazônicos / Ricardo Takashi Kuwano. - 2026.
147 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Valmir César Pozzetti.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, Manaus, 2026.
1. Externalidades ambientais. 2. Federalismo ambiental. 3. Floresta amazônica. 4. Pagamento por serviços ambientais. 5. Serviços ecossistêmicos. I. Pozzetti, Valmir César. II. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia. III. Título
-

RICARDO TAKASHI KUWANO

**OS SERVIÇOS AMBIENTAIS PRESTADOS PELA FLORESTA AMAZÔNICA E A
PROPOSTA DE REMUNERAÇÃO FINANCEIRA PARA A MANUTENÇÃO DA
FLORESTA EM PÉ PELOS ESTADOS NACIONAIS NÃO AMAZÔNICOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Doutor em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia. Área de concentração: Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia (CASA) na linha de pesquisa: Conservação dos Recursos Naturais

Aprovada em 22 de maio de 2026.

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Valmir César Pozzetti
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Profa. Dra. Alichelly Carina Macedo Ventura
Universidade do Estado do Amazonas - UEA

Prof. Dr. Luis Gonzaga Lopes do Nascimento Junior
Oliveira Energia

Prof. Dr. Luiz Cláudio Pires Costa
Centro Universitário de Ensino Superior do Amazonas - CIESA

Profa. Dra. Marie Joan Nascimento Ferreira
Tribunal Regional do Trabalho

Profa. Dra. Marília Gabriela Gondim Rezende
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese à minha família, pelo apoio, compreensão e incentivo ao longo de toda esta trajetória acadêmica. Em especial, aos meus filhos, Matheus Toshio e Alice Sayuri, cuja presença diária representa inspiração constante e renovação de propósito, à minha esposa, Alzenira, pelo companheirismo, paciência e apoio nos momentos de maior desafio; e aos meus pais, que, mesmo longe, apoiaram minhas decisões.

Dedico também este trabalho à Floresta Amazônica e às populações que historicamente mantêm relações de cuidado, respeito e interdependência com a natureza, inspirando reflexões sobre justiça ecológica, proteção ambiental e os direitos da natureza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força, perseverança e sabedoria concedidas ao longo desta trajetória.

À minha família, pelo apoio incondicional, pela compreensão diante das ausências e pelo incentivo permanente durante o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial, à minha esposa, pelo companheirismo, pelo suporte nos momentos de maior desafio e pelo constante incentivo, e aos meus filhos, que foram fonte contínua de motivação e inspiração.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Dr. Valmir César Pozzetti, pela orientação, confiança, inspiração e contribuições fundamentais para a construção desta tese.

Aos professores, pesquisadores e colegas que, de diferentes formas, contribuíram para meu amadurecimento acadêmico e para o desenvolvimento das reflexões apresentadas neste trabalho.

Agradeço aos membros da banca examinadora pelas importantes contribuições e sugestões apresentadas durante a defesa desta tese, as quais contribuíram significativamente para o seu aprimoramento.

Por fim, manifesto minha gratidão a todos aqueles que atuam na defesa da Floresta Amazônica, da biodiversidade e das populações que, historicamente, contribuem para a preservação dos sistemas ecológicos da região.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi propor um modelo de remuneração dos serviços ambientais amazônicos baseado na capacidade econômica das unidades federativas brasileiras, articulando critérios econômicos e territoriais. A metodologia utilizada nesta pesquisa foi o método dedutivo, por meio do qual se realizaram análises gerais para se chegar a um resultado particular. Quanto aos meios utilizados, recorreu-se à doutrina, à legislação e à pesquisa empírica na rede mundial de computadores, utilizando-se uma abordagem sistêmica de coleta de dados observáveis, evidências reais, observações e experiências concretas, a partir de dados econômicos e territoriais provenientes de fontes oficiais, o que permitiu a simulação dos fluxos financeiros e a avaliação de seus efeitos distributivos. Quanto à finalidade, a pesquisa buscou produzir um resultado qualiquantitativo, ou seja, combinaram-se métodos qualitativos – com interpretação de subjetividades, significados e diversas posições doutrinárias – com métodos quantitativos – baseados na mensuração numérica, percentuais e análises estatísticas – integrando, de forma aprofundada, os “porquês” e o “quanto”, o que propiciou um resultado mais rico e completo. O resultado obtido demonstrou a viabilidade operacional do modelo e seu potencial para promover a internalização das externalidades ambientais positivas associadas à conservação da floresta amazônica, ao redistribuir os encargos ambientais de forma proporcional à capacidade econômica dos estados. A conclusão demonstrou que o modelo contribui para a construção de um mecanismo de compensação ambiental mais equitativo, favorecendo a valorização dos serviços ecossistêmicos e o fortalecimento da governança ambiental no contexto federativo brasileiro.

Palavras-chave: externalidades ambientais; federalismo ambiental; floresta amazônica; pagamento por serviços ambientais; serviços ecossistêmicos.

ABSTRACT

The objective of this research was to propose a compensation model for Amazonian environmental services based on the economic capacity of Brazilian federative units, integrating economic and territorial criteria. The methodology adopted in this study was the deductive method, through which general analyses were conducted in order to reach a particular conclusion. Regarding the means employed, the research relied on doctrinal analysis, legislation, and empirical research available on the internet, using a systemic methodology for collecting observable data, real evidence, observations, and concrete experiences derived from economic and territorial data from official sources. This approach enabled the simulation of financial flows and the assessment of their distributive effects. In terms of purpose, the research aimed to produce a quali-quantitative outcome, combining qualitative methods – such as the interpretation of subjectivities, meanings, and diverse doctrinal positions—with quantitative methods – such as numerical measurement, percentiles, and statistical analysis – thereby integrating both the “why” and the “how much,” resulting in a richer and more comprehensive outcome. The results demonstrated the operational feasibility of the model and its potential to promote the internalization of positive environmental externalities associated with the conservation of the Amazon rainforest by redistributing environmental burdens proportionally to the economic capacity of the states. The conclusion indicates that the model contributes to the development of a more equitable environmental compensation mechanism, fostering the valuation of ecosystem services and strengthening environmental governance within the Brazilian federal context.

Keywords: Amazon rainforest; ecosystem services; environmental externalities; environmental federalism; payment for environmental services.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relações entre propriedades edáficas, processos ecológicos e implicações sistêmicas na Amazônia.....	19
Quadro 2 – Dinâmica do sistema hidrológico amazônico e fatores de vulnerabilidade	21
Quadro 3 – Principais elementos da sociobiodiversidade amazônica	25
Quadro 4 – Amazônia e equilíbrio ambiental global.....	30
Quadro 5 – Impactos da elevação do nível do mar.....	34
Quadro 6 – Paradigmas da proteção ambiental	38
Quadro 7 – Modelos constitucionais de proteção da natureza nos países amazônicos	41
Quadro 8 – Fundamentos teóricos da função ambiental da natureza	48
Quadro 9 – Marcos teóricos e limitações do desenvolvimento sustentável	51
A análise desses princípios evidencia que eles atuam de forma integrada, orientando tanto a prevenção quanto a responsabilização por danos ambientais. Com base nessa compreensão, suas principais funções podem ser sintetizadas conforme apresentado no Quadro 10.	
Quadro 10 – Princípios ambientais e suas funções normativas.....	54
Quadro 11 – Dimensões do equilíbrio ecológico e da sustentabilidade	59
Quadro 12 – Principais impactos ambientais do desmatamento amazônico	64
Quadro 13 – Assimetria na distribuição dos custos da conservação e dos benefícios ambientais da floresta amazônica	69
Quadro 14 – Principais limitações institucionais na proteção da floresta amazônica	73
Quadro 15 – Principais impactos da perda de biodiversidade na Amazônia.....	76
Quadro 16 – Classificação dos Serviços Ecossistêmicos	79
Quadro 17 – Processos de regulação climática e armazenamento de carbono na Amazônia ..	82
Quadro 18 – Síntese do ciclo hidrológico amazônico e dos “rios voadores”	84
Quadro 19 – Síntese da função ecológica, climática e econômica da biodiversidade amazônica	87
Quadro 20 – Síntese dos efeitos da cobertura florestal sobre clima.....	91
Quadro 21 – Síntese dos processos de conservação do solo e da qualidade da água na Amazônia.....	94
Quadro 22 – Elementos estruturais dos programas de Pagamento por Serviços Ambientais ..	95
Quadro 23 – Comparação de programas de PSA (internacionais e nacionais)	97
Quadro 24 – Métodos de valoração econômica dos serviços ambientais.....	102
Quadro 25 – Instrumentos econômicos e financeiros para a conservação ambiental	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações utilizadas na simulação e fontes dos dados.....	120
Tabela 2 – Estimativa de contribuição financeira por estado com base no Valor Adicionado Bruto (VAB).....	121
Tabela 3 – Área do bioma Amazônia e participação territorial das unidades federativas.....	122
Tabela 4 – Estimativa de distribuição dos recursos.....	123

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CASA – Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia

CF/88 – Constituição Federal de 1988

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPBES – Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

PIB – Produto Interno Bruto

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

PPGCASA – Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia

PSA – Pagamento por Serviços Ambientais

PES – Payment for Ecosystem Services

TPA – Terra Preta Amazônica

TPI – Terra Preta de Índio

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

VAB – Valor Adicionado Bruto

WWF – World Wide Fund for Nature

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
1 CARACTERIZAÇÃO DO BIOMA AMAZÔNICO E SUA IMPORTÂNCIA AMBIENTAL.....	17
1.1 A Composição do bioma amazônico	17
1.2 A sociobiodiversidade e a importância ecológica da Floresta Amazônica	23
1.3 A crise ambiental global e seus desafios	27
1.4 Ética ambiental e os direitos da natureza nas constituições dos países amazônicos	35
2 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E A APTIDÃO NATURAL DA FLORESTA AMAZÔNICA.....	44
2.1 A Função essencial da Floresta Amazônica e sua vocação ambiental	44
2.2 Sustentabilidade ambiental e desenvolvimento sustentável	48
2.3 Princípios ambientais e a regulação da relação entre homem e natureza.....	52
2.4 A necessidade de manutenção do equilíbrio ecológico e seus limites	57
3 CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS DA DERRUBADA DA FLORESTA E DA UTILIZAÇÃO PREDATÓRIA DOS RECURSOS NATURAIS.....	61
3.1 Impactos ambientais da exploração predatória da floresta.....	61
3.2 Internalização dos custos ambientais.....	67
3.3 Limitações institucionais do Estado na proteção ambiental.....	70
3.4 Perda da biodiversidade.....	73
4 OS SERVIÇOS AMBIENTAIS PRESTADOS PELA FLORESTA AMAZÔNICA	78
4.1 Regulação climática e armazenamento de carbono	79
4.2 Ciclo hidrológico dos "rios voadores" e manutenção da biodiversidade	82
4.3 Controle de chuvas, temperatura e conservação do solo e água.....	88
4.4 Estudo comparado de programas de pagamento por serviços ambientais.....	94
5 PROPOSTA DE UM MODELO DE REMUNERAÇÃO PELOS SERVIÇOS AMBIENTAIS DA FLORESTA AMAZÔNICA	99
5.1 Métodos de valoração econômica dos serviços ambientais.....	100
5.2 Externalidades ambientais e a necessidade de compensação	104
5.3 Instrumentos econômicos e financeiros para a conservação da floresta	106
5.4 Proposta de remuneração, estrutura do cálculo e aplicação do modelo de remuneração	
110	
CONCLUSÃO.....	127
REFERENCIAS	129

INTRODUÇÃO

A floresta amazônica constitui o maior bioma tropical contínuo do planeta Terra e desempenha papel estratégico na estabilidade ambiental em escala regional, nacional e global. Sua extensa cobertura vegetal, elevada biodiversidade e capacidade de influenciar os ciclos climáticos e hidrológicos do planeta configuram-na como um sistema ecológico essencial à manutenção das condições ambientais que sustentam a vida de todos os seres planetários, pois este bioma realiza, de forma natural, diversos serviços ambientais (para os fins desta pesquisa, os termos “serviços ambientais” e “serviços ecossistêmicos” são empregados como funcionalmente equivalentes. Adota-se, contudo, a expressão “serviços ecossistêmicos” como termo predominante na fundamentação científica, preservando-se a expressão “serviços ambientais” nas referências à legislação brasileira). Entre os principais serviços ecossistêmicos por ela prestados destacam-se a regulação climática, a manutenção do ciclo hidrológico, a conservação da biodiversidade, o armazenamento de carbono e a influência sobre o regime de chuvas em diferentes regiões do Brasil.

Apesar dessa relevância, a floresta amazônica encontra-se submetida a pressões contínuas decorrentes do desmatamento, da expansão agropecuária, da exploração madeireira ilegal, da mineração ilegal e de outras formas de uso predatório dos recursos naturais. Tais processos comprometem a capacidade funcional da floresta de manter seus serviços ecossistêmicos, afetando não apenas a estabilidade ecológica da região, mas também atividades econômicas e condições de vida em outras partes do território brasileiro e também do planeta como um todo, pois a sua grande extensão territorial contribui para a redução do aquecimento global e para a produção de oxigênio limpo, vital à vida.

Diante desse cenário, esta pesquisa tem como objetivo geral analisar os serviços ecossistêmicos prestados pela floresta amazônica e propor um mecanismo jurídico-econômico de pagamento por serviços ambientais, baseado na capacidade econômica das unidades federativas brasileiras, como instrumento de conservação da floresta em pé. Como objetivos específicos, busca-se: caracterizar o bioma amazônico e seus principais serviços ecossistêmicos; analisar a função ecológica da floresta na regulação climática e hidrológica em escala nacional; avaliar os impactos ambientais decorrentes do desmatamento; examinar a importância da manutenção da floresta em pé; e desenvolver uma proposta de remuneração pelos serviços ecossistêmicos por ela prestados.

O ineditismo desta pesquisa está na propositura de se viabilizar a obrigação de pagamento por serviços ambientais pelos estados federados que não fazem parte do bioma

amazônico, tendo em vista que, se a floresta não for preservada/conservada, os prejuízos econômicos que sofrerão serão incalculáveis. A fundamentação jurídica para a cobrança deste pagamento encontra viabilidade no artigo 23 da Constituição Federal de 1988 (CF/88), que estabelece competência comum para proteger o meio ambiente, com foco na descentralização e na ação conjunta dos estados da federação.

O problema que instiga esta pesquisa é: de que forma os estados brasileiros não amazônicos podem contribuir, a partir de sua capacidade econômica, para a manutenção e conservação da floresta amazônica, considerando que usufruem dos serviços ecossistêmicos por ela gerados? Essa problematização decorre da existência de uma assimetria estrutural, na qual os benefícios ambientais da floresta amazônica se distribuem em escala nacional, enquanto os custos econômicos, institucionais e sociais da conservação permanecem concentrados, em grande medida, nos estados amazônicos.

A análise dessa assimetria pode ser compreendida à luz da teoria econômica das externalidades ambientais, segundo a qual determinados benefícios gerados por um agente ou sistema não são integralmente capturados por aquele que arca com os custos de sua produção. No caso da floresta amazônica, os serviços ecossistêmicos prestados por ela – tais como a regulação climática, a manutenção do ciclo hidrológico (rios voadores) e o armazenamento de carbono – produzem efeitos positivos que extrapolam os limites territoriais da região, beneficiando todo o território nacional, seja na amenidade do clima, seja na produção de grãos e de animais destinados à alimentação humana. Entretanto, os custos associados à conservação da floresta e, conseqüentemente, desses serviços, permanecem territorialmente concentrados, o que evidencia um descompasso entre a geração de benefícios e a distribuição dos encargos ambientais. Dentre os custos envolvidos, podemos citar o de defesa deste território contra invasores nacionais e internacionais predatórios, o da usurpação dos direitos dos povos indígenas e dos povos tradicionais que são os guardiões da floresta, dentre outros.

Nesse contexto, a ausência de mecanismos que distribuam de forma mais equilibrada os custos da conservação da floresta amazônica faz com que, muitas vezes, seja mais vantajoso destiná-la a atividades econômicas como a agropecuária ou a exploração de recursos naturais, que oferecem retorno mais imediato. Embora todos os estados brasileiros se beneficiem dos serviços ambientais desta floresta, a responsabilidade por sua conservação permanece concentrada nos estados onde ela está localizada. Como não existem mecanismos eficazes que promovam uma compensação entre os estados, esse desequilíbrio evidencia uma falha na forma como a proteção da floresta amazônica é organizada no país.

Dessa forma, a construção de um modelo de pagamento por serviços ambientais da floresta amazônica, baseado na capacidade econômica das unidades federativas, pode ser compreendida como um instrumento voltado à internalização dessas externalidades, promovendo maior equidade na distribuição dos encargos ambientais. Ao associar a contribuição financeira dos estados à sua capacidade econômica, busca-se estabelecer um critério de justiça distributiva que permita compatibilizar a conservação ambiental com a organização federativa, em consonância com o artigo 23 da Constituição Federal de 1988, contribuindo para a construção de um arranjo institucional mais eficiente e equilibrado.

A pesquisa justifica-se pela necessidade de desenvolver instrumentos capazes de enfrentar a crescente degradação da floresta amazônica e suas repercussões ambientais, sociais e econômicas. A continuidade da exploração predatória tende a produzir perdas ecológicas significativas, com impactos sobre o regime de chuvas, a estabilidade climática, a biodiversidade, a qualidade de vida das populações e a própria dinâmica econômica nacional. Nesse contexto, torna-se fundamental estruturar mecanismos que reconheçam economicamente os serviços ecossistêmicos prestados pela floresta e promovam uma distribuição mais equitativa dos encargos da conservação entre os entes federativos, no âmbito do federalismo ambiental; ou seja, aqueles estados da federação que possuem produtividade agropecuária e industrial e que lucram com essas atividades devem destinar uma parcela dos seus lucros aos estados que preservam/conservam a floresta em pé, em benefício do desenvolvimento econômico dos demais estados: uns renunciam às atividades econômicas agropecuárias e industriais e os outros fazem uso delas, mas devem contribuir financeiramente para com aqueles que renunciaram.

Quanto à metodologia utilizada nesta pesquisa, adotou-se o método dedutivo como estratégia de investigação, com base em pesquisa bibliográfica, legislativa e documental, a partir de livros, artigos científicos, documentos institucionais e dados oficiais. A abordagem é de natureza qualitativa e quantitativa: qualitativa, ao analisar os serviços ecossistêmicos, os fundamentos da sustentabilidade e os instrumentos jurídicos e econômicos de proteção ambiental; quantitativa, ao desenvolver um modelo numérico de contribuição financeira entre os estados brasileiros, com base em indicadores econômicos oficiais. Para tanto, utilizam-se dados territoriais e econômicos dos estados da federação brasileira, especialmente aqueles disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, possibilitando a formulação de uma proposta objetiva, transparente e aplicável ao contexto federativo brasileiro.

A tese está estruturada em introdução, cinco capítulos e conclusão. O primeiro capítulo apresenta a caracterização do bioma amazônico e sua importância ambiental. O segundo aborda a sustentabilidade ambiental e a aptidão natural da floresta amazônica. O terceiro examina as

consequências ambientais da derrubada da floresta e da utilização predatória dos recursos naturais. O quarto analisa os serviços ambientais prestados pela floresta amazônica, incluindo a regulação climática, o armazenamento de carbono, o ciclo hidrológico, a manutenção da biodiversidade e experiências de pagamento por serviços ambientais. O quinto apresenta a proposta de remuneração dos serviços ecossistêmicos, culminando na formulação de um modelo baseado na capacidade econômica das unidades federativas, mensurada por meio do Valor Adicionado Bruto (VAB).

1 CARACTERIZAÇÃO DO BIOMA AMAZÔNICO E SUA IMPORTÂNCIA AMBIENTAL

A compreensão da relevância dos serviços ecossistêmicos prestados pela Amazônia exige a análise estruturada das características que definem o bioma e de sua importância em escala regional, nacional e global. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025, p. 1), bioma pode ser entendido como:

Bioma é um conjunto de vida (vegetal e animal) constituído pelo agrupamento de tipos de vegetação contíguos e identificáveis em escala regional, com condições geoclimáticas similares e história compartilhada de mudanças, resultando em uma diversidade biológica própria.

Trata-se, portanto, de um sistema complexo, cuja dinâmica resulta da interação entre elementos físicos, biológicos e socioeconômicos, conferindo-lhe papel estratégico na estabilidade dos processos ambientais do planeta.

A análise do bioma não pode se restringir a uma abordagem descritiva de seus componentes naturais. Ao contrário, requer uma perspectiva sistêmica, capaz de apreender a interdependência entre seus elementos estruturais e funcionais, bem como suas implicações para o equilíbrio climático, hidrológico e ecológico. Nesse contexto, a Amazônia deve ser compreendida como um sistema ambiental ativo, cuja integridade condiciona a manutenção de processos essenciais à vida e ao funcionamento das atividades econômicas.

1.1 A Composição do bioma amazônico

A compreensão da composição do bioma amazônico exige uma abordagem que ultrapasse a descrição isolada de seus elementos naturais, incorporando a análise das interações ecológicas que sustentam seu funcionamento. A Amazônia configura-se como o maior contínuo de floresta tropical do planeta, constituindo um sistema ambiental de escala continental cuja complexidade decorre da interdependência entre processos físicos, biológicos e climáticos.

A dimensão territorial do bioma deve ser compreendida a partir de sua abrangência multinacional. Nesse sentido, a Rede Amazônica de Informação Socioambiental Georreferenciada (RAISG, 2020, p. 10) afirma que “Nove países possuem frações do que chamamos aqui de Amazônia: Bolívia, Brasil, Colômbia, Equador, Guayana, Guayana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela”. Essa configuração evidencia que o bioma transcende limites

político-administrativos, constituindo um sistema ecológico contínuo cuja dinâmica não pode ser analisada a partir de recortes nacionais isolados, o que reforça a necessidade de abordagens integradas para sua compreensão e gestão.

No contexto brasileiro, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022, s.p.) destaca que “O Bioma Amazônia ocupa cerca de 49% do território brasileiro”. Esse dado reforça que a Amazônia não constitui um componente periférico do território nacional, mas um elemento estruturante da estabilidade ambiental do país, influenciando diretamente processos ecológicos, climáticos e hidrológicos.

A composição física do bioma amazônico revela uma de suas características estruturais mais relevantes: a baixa fertilidade natural dos solos. Fearnside (2005, p. 5) afirma que “Soil erosion, nutrient depletion, and soil compaction are among the most obvious impacts of deforestation”¹. A partir dessa evidência, compreende-se que a remoção da cobertura vegetal compromete diretamente a integridade funcional do solo, uma vez que interrompe os processos de ciclagem de nutrientes que sustentam a produtividade do ecossistema.

Essa limitação é aprofundada pela baixa disponibilidade de fósforo. Cunha et al. (2022, p. 1) afirmam que “the majority of the Amazonia [...] is characterised by soils even more depleted in P [...]”² e, na página 3, acrescentam que “our results clearly demonstrate that NPP in this forest is limited by P alone”³. Esses resultados sugerem que a produtividade do ecossistema está estruturalmente condicionada à disponibilidade de nutrientes, especialmente de fósforo, o que reforça a dependência da cobertura vegetal como mecanismo de manutenção da fertilidade.

De forma complementar, Frare et al. (2023, p. 1) destacam que “Na Amazônia, as condições naturais de baixa fertilidade e elevada acidez dos solos impõem grandes desafios para a manutenção da produção agrícola”. Essa constatação evidencia que as limitações produtivas da região decorrem de características intrínsecas do sistema edáfico (relativo às características e aos processos do solo), exigindo estratégias de manejo fundamentadas na conservação da matéria orgânica e na manutenção dos processos ecológicos.

Essas relações podem ser sintetizadas a partir de uma perspectiva sistêmica, conforme apresentado no Quadro 1.

¹ Tradução nossa: Erosão do solo, perda de nutrientes e compactação do solo estão entre os impactos mais evidentes do desmatamento.

² Tradução nossa: a maior parte da Amazônia [...] é caracterizada por solos ainda mais pobres em P.

³ Tradução nossa: nossos resultados demonstram claramente que a produtividade primária líquida (NPP) nessa floresta é limitada exclusivamente pelo fósforo.

Quadro 1 – Relações entre propriedades edáficas, processos ecológicos e implicações sistêmicas na Amazônia

Propriedade do solo	Processo ecológico associado	Consequência sistêmica	Implicação para uso do solo
Baixa fertilidade	Dependência da biomassa e da ciclagem biológica de nutrientes via serrapilheira	Alta sensibilidade à perturbação e à retirada da cobertura vegetal	Baixa sustentabilidade agrícola e necessidade de conservação da biomassa
Baixa disponibilidade de fósforo	Limitação da produtividade primária	Restrição ao crescimento florestal	Necessidade de conservação da biomassa
Alta acidez	Restrição química ao desenvolvimento vegetal	Seleção de espécies adaptadas	Limitação do uso intensivo

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Fearnside (2005), Cunha et al. (2022) e Frare et al. (2023).

O Quadro 1 evidencia que as características do solo do bioma amazônico não atuam de forma isolada, mas estão articuladas a processos ecológicos que condicionam o funcionamento do sistema. Observa-se que a baixa fertilidade e a limitação por fósforo constituem fatores estruturantes da dinâmica ecológica, na medida em que tornam o sistema altamente dependente da ciclagem biológica de nutrientes. A associação entre dependência da biomassa e vulnerabilidade ao desmatamento indica que a estabilidade do sistema está diretamente vinculada à integridade da cobertura vegetal, o que impõe limites estruturais ao uso intensivo do solo.

A relação entre uso do solo e degradação ambiental revela-se particularmente crítica em contextos de conversão da cobertura florestal para atividades produtivas. Bieluczyk et al. (2025, p. 9) demonstram que “a single slash-and-burn event [...] mostly erased the benefits of two decades of forest regeneration on soil health”⁴. Esse resultado evidencia que intervenções antrópicas podem não apenas interromper, mas reverter processos ecológicos que demandam longos períodos para se estabelecer, indicando elevada vulnerabilidade do sistema a perturbações abruptas.

Outro elemento estruturante do bioma amazônico é sua hidrografia. Espinoza et al. (2024, p. 1) afirmam que “the Amazon basin represents the largest hydrological basin on Earth [...] with 16–18% of the global freshwater discharge to the oceans”⁵, enquanto Kurek et al. (2021, p. 2) destacam que “The Amazon is the largest river on Earth by discharge and drainage area, contributing almost 20% of the global riverine discharge to the ocean and draining a

⁴ Tradução nossa: um único evento corte e queima [...] praticamente eliminou os benefícios de duas décadas de regeneração florestal sobre a saúde do solo.

⁵ Tradução nossa: A bacia amazônica representa a maior bacia hidrográfica da Terra [...] com 16–18% da descarga global de água doce para os oceanos.

massive basin of over $6 \times 10^6 \text{ km}^2$ ”⁶. Esses dados revelam que o sistema hidrológico amazônico exerce influência significativa sobre o balanço hídrico global.

A interação entre vegetação e atmosfera constitui elemento central dessa dinâmica. Nobre (2014, p. 15) afirma que “A transpiração promove a sucção pelas raízes e o fluxo ao longo do tronco, até as folhas, da água do solo, que carrega consigo nutrientes; permite que a folha abra seus microportais para a atmosfera (estômatos), por onde sai o vapor [...]”. Esse mecanismo demonstra que a vegetação atua como componente ativo na circulação de água, contribuindo para a formação de chuvas e para a manutenção do equilíbrio hidrológico. Esse processo contribui para a formação dos chamados “rios voadores”, fluxos atmosféricos que transportam umidade a longas distâncias.

Esse sistema apresenta elevada sensibilidade às mudanças climáticas. Science Panel for the Amazon (2024, p. 4) afirma que “[...] tem ocorrido um aumento da frequência e intensidade dessas secas, principalmente devido ao aquecimento global causado pelo ser humano, o desmatamento e a degradação florestal [...]”, evidenciando que a intensificação dos eventos de seca está diretamente associada a fatores climáticos e antrópicos. Nesse contexto, Wagner et al. (2024, p. 14) observam que “the water surface decreased to 68.1% of the maximum observed and 81.0% of the median observed during the period 2022–2023”⁷, no rio Negro, demonstrando que eventos extremos de seca provocam reduções expressivas na extensão da superfície hídrica. Essas evidências indicam alterações no regime hidrológico, revelando a crescente vulnerabilidade do sistema frente a perturbações climáticas. Esses processos podem ser sintetizados conforme apresentado no Quadro 2.

⁶ Tradução nossa: O Amazonas é o maior rio da Terra em vazão e área de drenagem, contribuindo com quase 20% da descarga fluvial global para o oceano e drenando uma extensa bacia de mais de $6 \times 10^6 \text{ km}^2$.

⁷ Tradução nossa: a superfície da água diminuiu para 68,1% do máximo observado e 81,0% da mediana observada durante o período de 2022–2023.

Quadro 2 – Dinâmica do sistema hidrológico amazônico e fatores de vulnerabilidade

Elemento ou fator	Processo associado	Escala de atuação	Impacto sistêmico	Referência científica
Evapotranspiração	Transferência de água para a atmosfera	Regional/continental	Formação de chuvas	Nobre (2014)
Bacia hidrográfica	Escoamento e descarga fluvial	Global	Regulação do balanço hídrico	Espinoza et al. (2024); Kurek et al. (2021)
Vegetação	Interação biosfera-atmosfera	Regional	Reciclagem de umidade	Nobre (2014)
Uso do solo	Desmatamento e queimadas	Local/regional	Degradação ecológica	Bieluczyk et al. (2025)
Eventos extremos	Secas intensificadas	Regional	Redução da disponibilidade hídrica e da extensão da superfície de água	Science Panel for the Amazon (2024); Wagner et al. (2024)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Nobre (2014), Espinoza et al. (2024), Kurek et al. (2021), Bieluczyk et al. (2025), Science Panel for the Amazon (2024) e Wagner et al. (2024).

O Quadro 2 demonstra que o sistema hidrológico amazônico resulta da interação entre processos atmosféricos, biológicos e antrópicos. Destaca-se que a evapotranspiração desempenha papel central na formação de chuvas, evidenciando que a vegetação atua como agente ativo na regulação climática. Por outro lado, a incorporação de fatores antrópicos, como o desmatamento e o uso do solo, revela que intervenções humanas podem comprometer esse equilíbrio. A intensificação de eventos extremos evidencia a crescente instabilidade do regime hidrológico, reforçando a elevada vulnerabilidade do sistema frente às mudanças climáticas. Essas alterações hidrológicas e climáticas produzem impactos diretos na dinâmica ecológica do bioma, especialmente na biodiversidade e na estabilidade ecossistêmica.

No que se refere à composição biológica, Peres et al. (2010, p. 2314) afirmam que “Lowland and Andean Amazonia exhibit the greatest expression of tropical biodiversity on Earth”⁸, evidenciando a centralidade da região para a biodiversidade global, bem como a interdependência entre as regiões andina e de terras baixas, nas quais os Andes fornecem sedimentos e nutrientes essenciais à bacia amazônica. Assim, a conservação da biodiversidade depende da conectividade entre esses compartimentos.

Essa importância também é apontada pelo Science Panel for the Amazon (2025, p. 10), que afirma que “an extraordinary share of the world’s biodiversity: nearly 13% of known species”⁹, indicando que o bioma abriga uma parcela expressiva da diversidade biológica mundial. Essa evidência reforça a relevância ecológica da região em escala global,

⁸ Tradução nossa: A Amazônia de terras baixas e andina apresenta a maior expressão da biodiversidade tropical na Terra.

⁹ Tradução nossa: uma parte extraordinária da biodiversidade mundial: quase 13% das espécies conhecidas.

demonstrando que a biodiversidade constitui um elemento estruturante do sistema amazônico, sustentando a complexidade das interações ecológicas, a estabilidade dos ecossistemas e a provisão de serviços ecossistêmicos essenciais.

Além de sua relevância biológica, o bioma amazônico exerce papel fundamental no funcionamento do sistema terrestre. Artaxo et al. (2022, p. 1) afirmam que “Tropical forests are critically important for the global climate because of their impact on the radiation, hydrology, and biogeochemical cycles”¹⁰, evidenciando que as florestas tropicais influenciam diretamente processos climáticos e ambientais essenciais, especialmente por meio da regulação do ciclo hidrológico, do armazenamento de carbono e das interações atmosféricas em escala global. Da mesma forma, Davidson et al. (2012, p. 321) afirmam que “The river system produces about 20% of the world’s freshwater discharge, and the forest biomass holds about 100 billion tonnes of carbon [...] which is equivalent to more than 10 years’ worth of global fossil-fuel emissions”¹¹, demonstrando que a Amazônia desempenha função estratégica na estabilidade climática e hidrológica do sistema terrestre.

No que se refere ao ciclo global do carbono, a floresta amazônica desempenha função relevante. Gatti et al. (2021, p. 388) afirmam que “Amazonia hosts the Earth’s largest tropical forests and has been shown to be an important carbon sink over recent decades”¹², evidenciando que o bioma atua como importante sumidouro de carbono ao absorver grandes quantidades de dióxido de carbono da atmosfera. Essa capacidade contribui para a regulação climática global, uma vez que reduz a concentração de gases de efeito estufa e auxilia na mitigação das mudanças climáticas.

A análise integrada da composição do bioma amazônico evidencia que sua complexidade decorre da interação contínua entre componentes físicos, biológicos e climáticos, cuja estabilidade depende da manutenção dos processos ecológicos que estruturam o sistema. Dessa forma, compreender a Amazônia exige reconhecer não apenas sua dimensão territorial e biológica, mas também sua relevância funcional para a estabilidade climática, hidrológica e ecológica em múltiplas escalas. Nesse contexto, a relação entre sociedade e natureza assume papel central na compreensão das dinâmicas de conservação e degradação do bioma, aspecto que será aprofundado na seção seguinte.

¹⁰ Tradução nossa: As florestas tropicais são extremamente importantes para o clima global devido à sua influência sobre a radiação, os ciclos hidrológicos e os ciclos biogeoquímicos.

¹¹ Tradução nossa: O sistema fluvial produz cerca de 20% da descarga mundial de água doce, e a biomassa florestal armazena aproximadamente 100 bilhões de toneladas de carbono [...], o que equivale a mais de dez anos de emissões globais provenientes de combustíveis fósseis.

¹² Tradução nossa: A Amazônia abriga as maiores florestas tropicais da Terra e tem sido reconhecida como um importante sumidouro de carbono nas últimas décadas.

1.2 A sociobiodiversidade e a importância ecológica da Floresta Amazônica

A compreensão do bioma amazônico exige a consideração de sua dimensão sociocultural, uma vez que os sistemas naturais e sociais se articulam de forma integrada na configuração do território. A Amazônia constitui um espaço de elevada diversidade sociocultural, no qual povos indígenas e comunidades tradicionais desenvolveram formas próprias de interação com a floresta, configurando um sistema socioecológico complexo.

Nesse contexto, o conceito de sociobiodiversidade assume papel central na análise da sustentabilidade do bioma. O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018, p. 9) define sociobiodiversidade como “conceito que expressa a inter-relação entre a diversidade biológica e a diversidade de sistemas socioculturais”, evidenciando que a conservação ambiental não pode ser compreendida exclusivamente sob a perspectiva ecológica. Essa definição revela que os processos naturais se articulam às práticas sociais e culturais, de modo que a biodiversidade também resulta de construções históricas desenvolvidas pelas populações humanas.

Sob essa perspectiva, Heckenberger et al. (2003, p. 1710) questionam: “Was the Amazon a natural forest in 1492, sparsely populated and essentially pristine, as has been traditionally thought? Or, instead, were parts of it densely settled and better viewed as cultural forests [...]”¹³, indicando que determinadas áreas da Amazônia pré-colombiana eram ocupadas e manejadas por populações humanas organizadas socialmente. A partir dessa perspectiva, compreende-se que a formação histórica da floresta amazônica também resultou de dinâmicas prolongadas de ocupação e transformação humana, contribuindo para redefinir a concepção da Amazônia como ambiente intocado.

De forma complementar, Silva (2010, p. 20) afirma que:

A transformação do ambiente natural em cultural se deu, possivelmente, por meio da introdução de intensas atividades no manejo do ecossistema, cuja função era atender à necessidade da demanda populacional, mas também manter uma linha de compensação dos recursos naturais [...]

O autor demonstra que a ocupação humana ocorreu por meio de práticas articuladas às dinâmicas ambientais da floresta, revelando que a relação entre sociedade e natureza representa elemento estruturante da constituição histórica do bioma amazônico.

¹³ Tradução nossa: A Amazônia era uma floresta natural em 1492, pouco povoada e essencialmente intocada, como tradicionalmente se pensava? Ou, ao contrário, algumas de suas áreas eram densamente ocupadas e mais adequadamente compreendidas como florestas culturais [...]

A relação entre populações tradicionais e o ambiente é caracterizada por práticas adaptadas às condições ecológicas locais. Nesse sentido, Diegues (2000, p. 87) afirma que:

Esses sistemas tradicionais de manejo não são somente formas de exploração econômica dos recursos naturais, mas revelam a existência de um complexo de conhecimentos adquiridos pela tradição herdada dos mais velhos, de mitos e símbolos que levam à manutenção e ao uso sustentado dos ecossistemas naturais

O autor ressalta que os conhecimentos tradicionais envolvem dimensões ecológicas, culturais e simbólicas associadas ao uso sustentável dos recursos naturais. Essa interpretação evidencia que as populações tradicionais desenvolvem formas históricas de utilização do ambiente compatíveis com a conservação dos ecossistemas e a manutenção da biodiversidade.

Sob esse entendimento, Silva (2022, p. 14) destaca que “os povos da floresta têm uma gama de conhecimentos acumulados por muitos anos de vivência nesses espaços de floresta”, reforçando que os saberes tradicionais resultam de experiências continuamente construídas entre populações amazônicas e ambientes florestais.

Essa influência também se manifesta na composição biológica do bioma. Levis et al. (2017, p. 930) afirmam que “Our results suggest that past human interventions had an important and lasting role in the distribution of domesticated species found in modern forests”¹⁴, evidenciando que práticas humanas influenciaram a distribuição de espécies vegetais na Amazônia. Essa constatação revela uma dinâmica histórica de interação entre sociedades humanas e o ambiente amazônico, refletida na própria composição da floresta.

A formação das chamadas “terras pretas de índio” constitui outro exemplo desse processo. Glaser e Birk (2012, p. 49) afirmam que “terra preta is a model for sustainable soil fertility and long-term C sequestration even today created by an intelligent material flow management”¹⁵, evidenciando que populações pré-colombianas desenvolveram formas de manejo capazes de promover fertilidade duradoura do solo amazônico. Esse tipo de solo, conhecido como Terra Preta Amazônica (TPA) ou Terra Preta de Índio (TPI), demonstra a aplicação de conhecimentos ecológicos voltados ao uso e à gestão sustentável dos recursos ambientais.

A relevância dessas populações para a conservação ambiental tem sido reconhecida internacionalmente. A Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços

¹⁴ Tradução nossa: Nossos resultados sugerem que intervenções humanas do passado exerceram um papel importante e duradouro na distribuição de espécies domesticadas encontradas nas florestas atuais.

¹⁵ Tradução nossa: A terra preta constitui um modelo de fertilidade sustentável do solo e de sequestro de carbono em longo prazo, criado por meio de um manejo inteligente do fluxo de materiais.

Ecossistêmicos (IPBES, 2019, p. 14) afirma que “Nature is generally declining less rapidly in indigenous peoples’ land than in other lands, but is nevertheless declining, as is the knowledge of how to manage it”¹⁶, revelando que territórios manejados por povos indígenas apresentam menores níveis de degradação ambiental em comparação com outras áreas. Ao mesmo tempo, o relatório aponta que tanto os ecossistemas quanto os conhecimentos tradicionais associados ao manejo da natureza vêm sendo progressivamente ameaçados.

Os principais elementos que compõem a sociobiodiversidade amazônica podem ser organizados de forma sintética, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Principais elementos da sociobiodiversidade amazônica

Elemento	Caracterização	Relevância Socioecológica
Povos indígenas	Manejo tradicional do território	Conservação ambiental
Comunidades tradicionais	Práticas sustentáveis adaptadas ao ambiente	Sustentabilidade ecológica
Conhecimento tradicional	Saberes ecológicos acumulados	Gestão sustentável
Manejo histórico	Transformação antrópica da paisagem	Formação socioecológica

Fonte: Elaborado pelo autor (2026) com base em Diegues (2000), Heckenberger et al. (2003), Levis et al. (2017) e Glaser e Birk (2012).

O Quadro 3 reúne os principais elementos da sociobiodiversidade amazônica, resultantes da articulação entre diversidade biológica, conhecimentos tradicionais e práticas históricas de manejo desenvolvidas pelas populações locais. Esses elementos demonstram que a conservação da floresta amazônica não depende exclusivamente da proteção dos ecossistemas naturais, mas também da manutenção das relações socioculturais historicamente estabelecidas entre sociedade e natureza.

A relevância da sociobiodiversidade amazônica também se relaciona às funções ecológicas desempenhadas pela floresta em escala regional e global, especialmente no contexto das mudanças climáticas e da manutenção dos serviços ecossistêmicos. Nesse sentido, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2022, p. 9) afirma que “Climate change has caused substantial damages, and increasingly irreversible losses, in terrestrial, freshwater and coastal and open ocean marine ecosystems”¹⁷, evidenciando que as mudanças climáticas vêm comprometendo progressivamente a integridade ecológica de diferentes ecossistemas naturais. Essa constatação reforça a relevância da floresta amazônica para o equilíbrio

¹⁶ Tradução nossa: Em geral, a natureza nas terras indígenas está se degradando menos rapidamente do que em outras áreas, embora ainda apresente declínio, assim como os conhecimentos relacionados às formas de manejá-la.

¹⁷ Tradução nossa: As mudanças climáticas causaram danos substanciais e perdas cada vez mais irreversíveis em ecossistemas terrestres, de água doce, costeiros e marinhos.

ambiental global, ao mesmo tempo em que evidencia sua vulnerabilidade frente à degradação ambiental e às mudanças climáticas.

Corroborando essa perspectiva, o IPCC (2022, p. 14) afirma que “Biodiversity loss and degradation, damages to and transformation of ecosystems are already key risks for every region due to past global warming and will continue to escalate with every increment of global warming”¹⁸, indicando que as mudanças climáticas intensificam progressivamente os riscos ecológicos e os impactos sobre diferentes ecossistemas. Essa evidência demonstra que a degradação florestal intensifica processos de perda de biodiversidade, reduz a resiliência ecológica dos ecossistemas e compromete funções ambientais essenciais desempenhadas pela floresta amazônica.

A importância ecológica da floresta amazônica ultrapassa a dimensão da biodiversidade, alcançando funções essenciais para a estabilidade climática e hídrica. Nesse sentido, Nobre (2014, p. 31) afirma que “A remoção das florestas, ameaçando as chuvas e o clima, não derrotaria somente a competitiva agricultura; falta (ou excesso) de água afeta a produção de energia, as indústrias, o abastecimento das populações e a vida nas cidades”. A afirmação revela que a floresta exerce papel estratégico na regulação ambiental, influenciando diretamente o regime de chuvas, o equilíbrio climático e a disponibilidade hídrica. Dessa forma, a conservação da Amazônia constitui elemento fundamental para a manutenção dos sistemas ecológicos e das atividades socioeconômicas dependentes da estabilidade ambiental.

Assim, a sociobiodiversidade amazônica demonstra que a conservação da floresta depende não apenas da proteção de seus componentes naturais, mas também do reconhecimento dos conhecimentos, práticas e formas de organização social historicamente desenvolvidas pelas populações tradicionais. A articulação entre diversidade biológica e diversidade cultural constitui elemento central para a sustentabilidade do bioma, ao mesmo tempo em que reforça a importância dos serviços ecossistêmicos associados à floresta amazônica. Nesse contexto, a crescente intensificação da crise ambiental global evidencia a necessidade de compreender a Amazônia não apenas como patrimônio ecológico regional, mas como elemento estratégico para o equilíbrio ambiental planetário.

¹⁸ Tradução nossa: A perda e a degradação da biodiversidade, bem como os danos e a transformação dos ecossistemas, já constituem riscos-chave para todas as regiões em razão do aquecimento global ocorrido até o presente, e continuarão a se intensificar a cada incremento do aquecimento global.

1.3 A crise ambiental global e seus desafios

A análise da Amazônia exige sua inserção no contexto mais amplo da crise ambiental global, caracterizada pela intensificação das mudanças climáticas, pela perda acelerada da biodiversidade e pela crescente degradação dos ecossistemas em escala planetária. Esses processos manifestam-se de forma interdependente, indicando que os desafios ambientais contemporâneos não podem ser compreendidos a partir de recortes isolados, mas exigem abordagens integradas capazes de apreender a complexidade dos sistemas naturais.

Nesse cenário, a Amazônia ocupa posição estratégica, ao reunir características que a colocam simultaneamente como elemento essencial para a estabilidade ambiental e como uma das regiões mais vulneráveis à degradação. Ao desempenhar funções como regulação climática, manutenção do ciclo hidrológico e conservação da biodiversidade, o bioma assume papel estratégico no funcionamento do sistema terrestre. Contudo, a intensificação das pressões antrópicas tem comprometido sua integridade, evidenciando uma tensão estrutural entre sua importância ecológica e sua vulnerabilidade.

Essa dualidade orienta a análise a partir de dois eixos principais: o papel da Amazônia no equilíbrio ambiental global e os efeitos das mudanças climáticas sobre o sistema terrestre, dimensões interdependentes da atual crise ambiental.

a) O papel da Amazônia no equilíbrio ambiental global

A Amazônia desempenha papel fundamental no equilíbrio ambiental global, atuando como um dos principais reguladores dos processos climáticos e ecológicos do planeta. Sua relevância decorre das funções sistêmicas que exerce, influenciando diretamente a dinâmica atmosférica, o ciclo hidrológico e os fluxos de carbono.

Nesse sentido, Malhi et al. (2008, p. 169) afirmam que “Amazonian forests have been an important and continuous part of Earth system functioning since the Cretaceous”¹⁹, evidenciando que a floresta amazônica não constitui apenas um ecossistema regional, mas um componente historicamente integrado ao funcionamento do sistema terrestre. A afirmação demonstra que a Amazônia exerce, há milhões de anos, funções ecológicas essenciais relacionadas à estabilidade climática, à dinâmica atmosférica e à manutenção dos processos ambientais planetários.

¹⁹ Tradução nossa: As florestas amazônicas têm constituído parte importante e contínua do funcionamento do sistema terrestre desde o período Cretáceo.

A estabilidade desse sistema, entretanto, apresenta sinais de comprometimento. Boulton, Lenton e Boers (2022, p. 277) afirmam que “[...] the Amazon rainforest has been losing resilience since the early 2000s, risking dieback with profound implications for biodiversity, carbon storage and climate change at a global scale.”²⁰, indicando o enfraquecimento progressivo da capacidade de recuperação ecológica do bioma diante de perturbações ambientais. Essa constatação revela que a estabilidade ecológica da Amazônia não é permanente, sendo sensível às pressões climáticas e antrópicas contínuas.

A função climática da Amazônia está diretamente associada à dinâmica do carbono. Gatti et al. (2021, p. 388) afirmam que “This carbon sink seems to be in decline, however, as a result of factors such as deforestation and climate change”²¹, evidenciando que a capacidade da floresta amazônica de absorver carbono vem sendo progressivamente comprometida. Gatti et al. (2021, p. 390) destacam ainda que “Over nine years, [...] this region shows a possible carbon source to the atmosphere”²², indicando que determinadas regiões da Amazônia passaram a emitir mais carbono do que conseguem absorver. Essas constatações demonstram que o avanço do desmatamento, das queimadas e das mudanças climáticas interfere diretamente no equilíbrio ecológico do bioma, comprometendo progressivamente sua função como regulador climático e reduzindo sua contribuição para a mitigação do aquecimento global.

No mesmo sentido, Hubau et al. (2020, p. 6) afirmam que “although intact tropical forests remain major stores of carbon and are key centres of biodiversity, their ability to sequester additional carbon in trees is waning”²³, indicando que a capacidade das florestas tropicais africanas e amazônicas de remover carbono da atmosfera vem apresentando sinais de saturação. Essa constatação reforça que os impactos das mudanças climáticas e das pressões ambientais comprometem progressivamente a função reguladora exercida pelos ecossistemas florestais sobre o sistema climático global.

A regulação do ciclo hidrológico constitui outra função ecossistêmica essencial desempenhada pela floresta. Spracklen et al. (2012, p. 284) afirmam que “Through evapotranspiration, forests maintain atmospheric moisture that can return to land as rainfall

²⁰ Tradução nossa: a floresta amazônica vem perdendo resiliência desde o início dos anos 2000, correndo o risco de sofrer um processo de colapso florestal, com profundas implicações para a biodiversidade, o armazenamento de carbono e as mudanças climáticas em escala global.

²¹ Tradução nossa: Esse sumidouro de carbono parece estar em declínio, entretanto, em razão de fatores como o desmatamento e as mudanças climáticas.

²² Tradução nossa: Ao longo de nove anos, [...] essa região demonstrou uma possível condição de fonte de carbono para a atmosfera.

²³ Tradução nossa: Embora as florestas tropicais intactas permaneçam importantes reservatórios de carbono e constituam centros fundamentais de biodiversidade, sua capacidade de sequestrar carbono adicional nas árvores está diminuindo.

downwind. These processes operate on timescales of days over distances of 100–1,000 km”²⁴, indicando que a floresta amazônica exerce influência sobre a dinâmica hidrológica em escalas regionais e continentais. Essa relação demonstra que a Amazônia atua como sistema ativo na manutenção da umidade atmosférica e na geração de precipitação.

Essa dinâmica é aprofundada por Staal et al. (2020, p. 5) ao afirmarem que “the forest’s role in the hydrological cycle is so large that deforestation and/or climate change may trigger a tipping point”²⁵, indicando que a degradação da floresta amazônica compromete processos essenciais de regulação ambiental. Essa constatação evidencia que o avanço do desmatamento e das mudanças climáticas intensifica o risco de desequilíbrio ecológico e climático, uma vez que o “ponto crítico” representa a possibilidade de alterações ambientais graves e potencialmente irreversíveis no funcionamento da floresta amazônica.

Nesse contexto, Lovejoy e Nobre (2018, p. 1) afirmam que “negative synergies between deforestation, climate change, and widespread use of fire indicate a tipping point for the Amazon system to flip to non-forest ecosystems in eastern, southern and central Amazonia at 20-25% deforestation”²⁶, evidenciando que a intensificação das pressões ambientais compromete a estabilidade ecológica da floresta amazônica. Essa constatação reforça que o avanço do desmatamento, das queimadas e das mudanças climáticas pode desencadear alterações ambientais graves e potencialmente irreversíveis, favorecendo a conversão de áreas florestais em ecossistemas não florestais.

Nesse cenário de crescente degradação ambiental, os impactos não se restringem à estrutura física da floresta, mas também atingem diretamente a manutenção da biodiversidade amazônica e dos processos ecológicos essenciais ao equilíbrio dos ecossistemas. A importância ecológica da Amazônia também se expressa na conservação da biodiversidade. Dirzo et al. (2014, p. 403) afirmam que “[...] the impact of biodiversity losses on ecosystem functions is comparable in scale with that of other global changes (such as pollution and nutrient deposition)”²⁷, evidenciando que a perda de biodiversidade produz impactos ecológicos de magnitude semelhante àqueles provocados por outros processos globais de degradação

²⁴ Tradução nossa: Por meio da evapotranspiração, as florestas mantêm a umidade atmosférica que pode retornar à superfície terrestre na forma de chuva em outras regiões. Esses processos atuam em escalas temporais de dias e ao longo de distâncias entre 100 e 1.000 km.

²⁵ Tradução nossa: o papel da floresta no ciclo hidrológico é tão significativo que o desmatamento e/ou as mudanças climáticas podem desencadear um ponto crítico.

²⁶ Tradução nossa: sinergias negativas entre desmatamento, mudanças climáticas e uso disseminado do fogo indicam um ponto crítico para que o sistema amazônico seja convertido em ecossistemas não florestais no leste, sul e centro da Amazônia quando o desmatamento atingir entre 20% e 25%.

²⁷ Tradução nossa: [...] o impacto das perdas de biodiversidade sobre as funções ecossistêmicas é comparável, em escala, ao de outras mudanças globais (como poluição e deposição de nutrientes).

ambiental. No contexto amazônico, essa dinâmica compromete a estabilidade funcional dos ecossistemas e afeta processos ecológicos essenciais para a manutenção do equilíbrio ambiental da floresta.

Essa tendência é reforçada pelo IPBES (2019, p. 12), ao afirmar que “[...] around 1 million species already face extinction, many within decades, unless action is taken to reduce the intensity of drivers of biodiversity loss”²⁸, evidenciando a gravidade e a urgência da atual crise global da biodiversidade. No mesmo sentido, Díaz et al. (2019, p. 1) afirmam que “This unparalleled appropriation of nature is causing the fabric of life on which humanity depends to fray and unravel”²⁹, indicando que a intensificação das atividades humanas vem comprometendo progressivamente os sistemas ecológicos essenciais à manutenção da vida. Essas evidências demonstram que a conservação da Amazônia constitui elemento estratégico para a contenção da perda de biodiversidade e para a preservação do equilíbrio ecológico em escala global.

Os principais processos associados ao papel da Amazônia no equilíbrio ambiental global podem ser organizados conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Amazônia e equilíbrio ambiental global

Dimensão	Processo	Função
Climática	Regulação atmosférica	Estabilidade global
Carbono	Absorção de CO ₂	Mitigação climática
Hidrológica	Reciclagem de umidade	Formação de chuvas
Ecológica	Conservação da biodiversidade	Manutenção de processos
Sistêmica	Integração de funções	Equilíbrio ambiental

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Malhi et al. (2008), Gatti et al. (2021), Spracklen et al. (2012), IPBES (2019) e Díaz et al. (2019).

O Quadro 4 sintetiza os principais processos ecológicos e climáticos associados ao papel da Amazônia no equilíbrio ambiental global, evidenciando a interdependência entre regulação atmosférica, dinâmica hidrológica, conservação da biodiversidade e estabilidade ambiental.

De forma complementar, Flores et al. (2024, p. 557) afirmam que “18–27% of the biome may transition from stable forest to bistable”³⁰, evidenciando que parcelas significativas da Amazônia podem perder sua estabilidade exclusivamente florestal diante da intensificação das

²⁸ Tradução nossa: [...] cerca de 1 milhão de espécies já enfrentam risco de extinção, muitas nas próximas décadas, a menos que sejam adotadas medidas para reduzir a intensidade dos fatores de perda da biodiversidade.

²⁹ Tradução nossa: Essa apropriação sem precedentes da natureza está fazendo com que a trama da vida da qual a humanidade depende se desgaste e se desintegre.

³⁰ Tradução nossa: 18–27% do bioma podem passar de um estado de floresta estável para um estado bistável.

pressões ambientais. Nesse contexto, o estado bistável indica que determinadas áreas podem apresentar tanto condições de floresta quanto de formações semelhantes à savana, tornando o bioma mais vulnerável a perturbações climáticas e antrópicas. Os autores também afirmam que “2–6% may transition to stable savanna”³¹, indicando que algumas regiões podem ultrapassar limiares críticos de degradação e deixar de sustentar uma floresta tropical estável. Essa constatação sugere a possibilidade de mudanças estruturais duradouras no bioma, com impactos sobre a estabilidade climática, hidrológica e ecológica da Amazônia.

Dessa forma, o papel da Amazônia no equilíbrio ambiental global revela-se profundamente ambivalente. Ao mesmo tempo em que o bioma sustenta funções essenciais para a estabilidade climática, hídrica e ecológica do planeta, sua degradação compromete essas funções e intensifica a crise ambiental global. Essa dualidade reforça a necessidade de compreender a Amazônia como elemento estratégico do sistema terrestre, cuja conservação constitui condição fundamental para a sustentabilidade ambiental em escala global.

b) Mudanças climáticas e elevação do nível do mar

As mudanças climáticas constituem um dos principais eixos da crise ambiental contemporânea, resultando do aumento das concentrações de gases de efeito estufa e das alterações provocadas nos sistemas climáticos e ambientais. Embora o sistema climático terrestre apresente variabilidade ao longo do tempo, o atual processo de aquecimento global está predominantemente associado às atividades humanas.

Nesse sentido, o IPCC (2023, p. 42) afirma que “Human activities, principally through emissions of greenhouse gases, have unequivocally caused global warming, with global surface temperature reaching 1.1°C above 1850–1900 in 2011–2020”³², demonstrando o papel decisivo das atividades humanas na intensificação do aquecimento global. Essa afirmação demonstra que o aquecimento global não constitui um fenômeno natural isolado, mas resulta principalmente da intensificação das emissões de gases de efeito estufa decorrentes das atividades humanas.

Forster et al. (2023, p. 2296) também evidenciam a intensificação do aquecimento global ao afirmarem que “The indicators show that human-induced warming reached 1.14 [0.9

³¹ Tradução nossa: 2–6% podem se transformar em uma savana estável.

³² Tradução nossa: As atividades humanas, principalmente por meio das emissões de gases de efeito estufa, causaram inequivocamente o aquecimento global, com a temperatura média da superfície global atingindo 1,1°C acima dos níveis de 1850–1900 no período de 2011–2020.

to 1.4] °C averaged over the 2013–2022 decade and 1.26 [1.0 to 1.6] °C in 2022.”³³, evidenciando a intensificação progressiva do aquecimento global nas últimas décadas. Forster et al. (2023, p. 2297) destacam ainda que “This in turn has led to an intensification of many weather and climate extremes [...]”³⁴, sugerindo que o aumento da temperatura global vem ampliando a ocorrência de eventos climáticos extremos. Essas evidências demonstram que as mudanças climáticas apresentam impactos crescentes sobre os sistemas ambientais e humanos, agravando a atual crise ambiental global.

Essa tendência é reforçada por Perkins-Kirkpatrick e Lewis (2020, p. 5), que afirmam que “Our findings demonstrate the concerning rate of heatwave increases since the mid-twentieth century [...] changes in heatwaves are not only increasing but accelerating in the presence of anthropogenic climate change”³⁵, evidenciando que as ondas de calor vêm se intensificando progressivamente em decorrência das mudanças climáticas antrópicas. Essa constatação demonstra que as alterações térmicas associadas ao aquecimento global ampliam os riscos ambientais, sociais e sanitários relacionados aos eventos extremos.

A elevação do nível do mar constitui um dos impactos mais significativos das mudanças climáticas, com implicações diretas sobre sistemas naturais e humanos. O IPCC (2019, p. 323) afirma que “Global mean sea level (GMSL) is rising, and accelerating, in response to increasing rates of ocean warming and ice mass loss from glaciers and ice sheets”³⁶, evidenciando que o aumento do nível do mar ocorre de forma contínua em decorrência do aquecimento dos oceanos e do derretimento de massas de gelo continentais. Essa constatação revela que o fenômeno possui caráter progressivo e tende a ampliar seus impactos ao longo do tempo, embora estes se manifestem de forma desigual entre diferentes regiões costeiras.

Esses impactos já se manifestam no presente. O IPCC (2019, p. 55) afirma que “Coastal ecosystems are already impacted by the combination of SLR, other climate-related ocean changes, and adverse effects from human activities on ocean and land”³⁷, evidenciando que os efeitos das mudanças climáticas não se restringem a cenários futuros, uma vez que a

³³ Tradução nossa: Os indicadores mostram que o aquecimento induzido por atividades humanas atingiu 1,14 [0,9 a 1,4] °C na média da década de 2013–2022 e 1,26 [1,0 a 1,6] °C em 2022.

³⁴ Tradução nossa: Isso, por sua vez, levou à intensificação de muitos eventos climáticos e meteorológicos extremos [...]

³⁵ Tradução nossa: Nossos resultados demonstram a preocupante taxa de aumento das ondas de calor desde meados do século XX [...] as mudanças nas ondas de calor não estão apenas aumentando, mas acelerando na presença das mudanças climáticas antrópicas.

³⁶ Tradução nossa: O nível médio global do mar está aumentando e acelerando em resposta ao aumento das taxas de aquecimento dos oceanos e da perda de massa de gelo de geleiras e mantos de gelo.

³⁷ Tradução nossa: Os ecossistemas costeiros já estão sendo impactados pela combinação da elevação do nível do mar, de outras alterações oceânicas relacionadas ao clima e dos efeitos adversos das atividades humanas nos oceanos e no continente.

combinação entre elevação do nível do mar, alterações oceânicas e pressões antrópicas já compromete ecossistemas costeiros em diferentes regiões do planeta.

No que se refere aos impactos associados, o IPCC (2019, p. 328) afirma que:

Rising mean and increasingly extreme sea level threaten coastal zones through a range of coastal hazards including (i) the permanent submergence of land by higher mean sea levels or mean high tides; (ii) more frequent or intense coastal flooding; (iii) enhanced coastal erosion; (iv) loss and change of coastal ecosystems; (v) salinisation of soils, ground and surface water; and (vi) impeded drainage.³⁸

Essa evidência demonstra que a elevação do nível do mar produz impactos ambientais, sociais e econômicos amplos, comprometendo ecossistemas costeiros, recursos hídricos e áreas urbanas vulneráveis. Além dos efeitos físicos sobre o território, o avanço do nível do mar intensifica processos de erosão, inundação e salinização, ampliando a vulnerabilidade de populações e infraestruturas localizadas em zonas costeiras.

No que se refere à distribuição desses impactos, Hauer et al. (2021, p. 3) afirmam que “As the century progresses, SLR places the US coastal population at increasing chance of exposure to flooding”³⁹, evidenciando que a elevação do nível do mar amplia progressivamente a exposição de populações costeiras a eventos de inundação. Essa constatação revela que fatores territoriais, socioeconômicos e demográficos influenciam diretamente os níveis de vulnerabilidade frente aos impactos das mudanças climáticas, tornando determinadas regiões costeiras mais suscetíveis a esses impactos.

As projeções para as próximas décadas indicam a intensificação desse cenário. O IPCC (2019, p. 324) afirma que “ESLs that are historically rare (for example, today’s hundred-year event) will become common by 2100 [...]”⁴⁰, apontando que eventos extremos do nível do mar atualmente considerados raros tendem a ocorrer com maior frequência ao longo do século XXI. Essa projeção reforça que a elevação do nível do mar amplia progressivamente a exposição de populações e ecossistemas costeiros a eventos extremos.

Os principais impactos associados à elevação do nível do mar podem ser organizados conforme apresentado no Quadro 5.

³⁸ Tradução nossa: A elevação do nível médio do mar e dos níveis extremos do mar ameaça as zonas costeiras por meio de diversos riscos, incluindo: (i) submersão permanente de terras; (ii) inundações costeiras mais frequentes ou intensas; (iii) aumento da erosão costeira; (iv) perda e alteração de ecossistemas costeiros; (v) salinização de solos e águas subterrâneas e superficiais; e (vi) comprometimento da drenagem.

³⁹ Tradução nossa: À medida que o século avança, a elevação do nível do mar aumenta a probabilidade de exposição da população costeira dos Estados Unidos a inundações.

⁴⁰ Tradução nossa: eventos extremos do nível do mar que historicamente são raros (por exemplo, o atual evento de cem anos) se tornarão comuns até 2100.

Quadro 5 – Impactos da elevação do nível do mar

Impacto	Processo	Consequência socioambiental
Submersão	Aumento do nível médio do mar	Perda de território e deslocamento populacional
Inundações	Intensificação de eventos extremos	Danos urbanos e aumento da vulnerabilidade social
Erosão	Recuo costeiro	Perda de solo e degradação ambiental
Salinização	Intrusão de água marinha	Comprometimento dos recursos hídricos e agrícolas
Alteração ecossistêmica	Mudanças ambientais costeiras	Perda de biodiversidade e desequilíbrio ecológico

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em IPCC (2019).

A ampliação dos impactos econômicos associados a esse processo é evidenciada por Hallegatte et al. (2013, p. 802), ao afirmarem que “Average global flood losses in 2005 are estimated to be approximately US\$ 6 billion per year, increasing to US\$ 52 billion by 2050”⁴¹, indicando que os prejuízos econômicos decorrentes de inundações costeiras tendem a crescer significativamente nas próximas décadas. Essa análise demonstra que a elevação do nível do mar não apenas amplia a ocorrência de eventos extremos, mas também potencializa seus efeitos sobre sistemas urbanos, atividades econômicas e infraestruturas costeiras.

Os impactos da elevação do nível do mar não se restringem à dimensão econômica. Kulp e Strauss (2019, p. 9) afirmam que “sea-level rise this century may induce large-scale migration away from unprotected coastlines”⁴², evidenciando que a intensificação das inundações costeiras pode provocar deslocamentos populacionais em larga escala. Essa constatação demonstra que os impactos associados à elevação do nível do mar possuem dimensão social e territorial ampla, podendo ampliar pressões sobre áreas interiores e agravar situações de vulnerabilidade humana.

Além dos impactos sociais, econômicos e territoriais associados à elevação do nível do mar, as mudanças climáticas também afetam diretamente a biodiversidade e o funcionamento dos ecossistemas. Nesse sentido, Rubenstein et al. (2023, p. 1) afirmam que “species are expected to shift their distributions to higher latitudes, greater elevations, and deeper depths in response to rising temperatures associated with climate change”⁴³, indicando que o aumento

⁴¹ Tradução nossa: As perdas globais médias com inundações em 2005 foram estimadas em aproximadamente US\$ 6 bilhões por ano, aumentando para US\$ 52 bilhões até 2050.

⁴² Tradução nossa: a elevação do nível do mar neste século pode induzir migrações em larga escala para longe de litorais desprotegidos.

⁴³ Tradução nossa: espera-se que as espécies alterem suas distribuições para latitudes mais elevadas, maiores altitudes e maiores profundidades em resposta ao aumento das temperaturas associado às mudanças climáticas.

das temperaturas vem alterando padrões de distribuição geográfica das espécies em diferentes ecossistemas. Essa constatação demonstra que os impactos climáticos também comprometem a dinâmica ecológica e a manutenção da biodiversidade.

No contexto amazônico, esses impactos assumem características específicas em razão da elevada sensibilidade do bioma às mudanças climáticas. O Painel Científico para a Amazônia (PCA, 2025, p. 25) afirma que “Os efeitos das mudanças climáticas são evidentes na Bacia Amazônica por meio do aumento das temperaturas, maior frequência e intensidade de inundações e secas, e mudanças substanciais nos padrões de precipitação.”, demonstrando que as alterações climáticas vêm intensificando eventos extremos e comprometendo o equilíbrio hidroclimático da região amazônica. O PCA (2025, p. 30) destaca que “Os efeitos sinérgicos das mudanças no uso e na cobertura da terra, mudanças climáticas globais e extremos climáticos estão levando as áreas mais vulneráveis da Amazônia a pontos de não retorno”, indicando que a interação entre mudanças climáticas e degradação ambiental potencializa os riscos ecológicos e reduz a resiliência do bioma amazônico. Essas evidências demonstram que a Amazônia apresenta elevada vulnerabilidade ambiental diante da intensificação simultânea das pressões climáticas e antrópicas.

1.4 Ética ambiental e os direitos da natureza nas constituições dos países amazônicos

A ética ambiental representa uma inflexão na forma de compreender a relação entre sociedade e natureza, ao deslocar o foco de uma abordagem centrada exclusivamente nos interesses humanos para uma perspectiva que reconhece a relevância dos sistemas ecológicos em si mesmos. Essa transformação implica a superação de concepções instrumentais da natureza, tradicionalmente associadas ao paradigma antropocêntrico.

No campo da ética ambiental, destaca-se a ampliação da comunidade moral para além dos seres humanos. Nesse sentido, Aldo Leopold (1949, p. 262) afirma que “A thing is right when it tends to preserve the integrity, stability, and beauty of the biotic community. It is wrong when it tends otherwise”⁴⁴. Essa formulação desloca o fundamento ético da utilidade humana para a preservação da integridade ecológica, indicando que a ação humana deve ser orientada pela manutenção do equilíbrio dos sistemas ambientais.

⁴⁴ Tradução nossa: Uma ação é correta quando contribui para preservar a integridade, a estabilidade e a beleza da comunidade biótica. É incorreta quando produz o efeito contrário.

De forma complementar, Arne Naess (1973, p. 2) afirma que “the equal right to live and blossom is an intuitively clear and obvious value axiom”⁴⁵, evidenciando que todas as formas de vida possuem valor que não depende exclusivamente de sua utilidade para os seres humanos. Essa perspectiva reforça a base filosófica do ecocentrismo, ao reconhecer a natureza como elemento dotado de valor próprio.

No plano conceitual, essa transformação implica reconhecer que a natureza não pode ser compreendida apenas como objeto de exploração econômica. Essa perspectiva demonstra que a proteção ambiental deve considerar a integridade dos sistemas ecológicos como valor autônomo, especialmente em ecossistemas de elevada complexidade, como a floresta amazônica.

A incorporação desses fundamentos ao campo jurídico é destacada por Klaus Bosselmann (2017, p. 2), ao afirmar que “our survival depends on the ability to respect and maintain the Earth’s ecological integrity. This is the core idea of the principle of sustainability.”⁴⁶ Essa afirmação indica que a proteção jurídica deve ser orientada pela preservação dos sistemas ecológicos, deslocando o direito ambiental de uma lógica predominantemente utilitarista para uma abordagem fundada na integridade ecológica e na manutenção das condições sistêmicas que sustentam a vida.

a) Direitos da natureza

Os direitos da natureza emergem como expressão de um novo paradigma no direito ambiental, no qual os ecossistemas passam a ser reconhecidos como entidades dotadas de valor próprio e dignas de proteção jurídica direta. Essa abordagem representa uma reconfiguração dos fundamentos da tutela ambiental.

No campo jurídico, uma das formulações mais relevantes desse paradigma é apresentada por Christopher Stone (1972, p. 456), ao afirmar que “I am quite seriously proposing that we give legal rights to forests, oceans, rivers and other so-called ‘natural objects’ in the environment.”⁴⁷. Essa proposição indica a possibilidade de ampliar a titularidade jurídica para além dos seres humanos, reconhecendo a natureza como sujeito de direitos.

⁴⁵ Tradução nossa: o direito igual de viver e florescer é um axioma de valor intuitivamente claro e evidente.

⁴⁶ Tradução nossa: nossa sobrevivência depende da capacidade de respeitar e manter a integridade ecológica da Terra. Essa é a ideia central do princípio da sustentabilidade.

⁴⁷ Tradução nossa: Estou propondo muito seriamente que concedamos direitos jurídicos às florestas, oceanos, rios e outros chamados ‘objetos naturais’ do meio ambiente — na verdade, ao meio ambiente natural como um todo.

Esse movimento encontra respaldo em práticas normativas tradicionais e em formulações contemporâneas do ecocentrismo latino-americano. Nesse sentido, Gudynas (2011, p. 445) afirma que “intrinsic values are recognized, and Nature becomes a subject; human beings as the only source of values are therefore displaced.”⁴⁸. Essa perspectiva indica que o reconhecimento do valor intrínseco da natureza desloca a concepção antropocêntrica segundo a qual os seres humanos constituem a única fonte legítima de valor, reconhecendo os ecossistemas como entidades dotadas de valor independente de sua utilidade econômica.

No âmbito da governança ambiental, pode-se destacar o potencial transformador desse paradigma. Chapron, Epstein e López-Bao (2019, p. 1392) afirmam que “Rights of nature may offer benefits lacking in other types of legal protection for the environment.”⁴⁹. Essa afirmação sugere que o reconhecimento jurídico da natureza pode fortalecer mecanismos jurídicos voltados diretamente à integridade dos ecossistemas, diferenciando-se de modelos jurídicos centrados predominantemente em interesses humanos.

Essa tendência também se manifesta em escala global. Kauffman e Martin (2021, p. 1) utilizam a expressão Rights of Nature (RoN) para se referir aos direitos da natureza. Nesse sentido, os autores afirmam que “In January 2021, at least 185 legal provisions [...] recognizing RoN existed in 17 countries spanning five continents, and 50 more RoN laws were pending in a dozen other countries.”⁵⁰. Essa evidência indica a expansão internacional dos direitos da natureza em diferentes ordenamentos jurídicos, demonstrando sua consolidação progressiva no direito ambiental contemporâneo.

Essa evolução do pensamento jurídico é acompanhada pela formulação de novos referenciais teóricos voltados à proteção do sistema terrestre. Kotzé et al. (2022, p. 3) afirmam que “Earth system law therefore fully embraces the earth system’s key characteristics such as interconnectedness, unpredictability, instability, and complexity.”⁵¹. Essa afirmação indica que o direito deve incorporar uma perspectiva sistêmica, capaz de considerar as interações ecológicas e os limites planetários.

Os principais paradigmas que orientam a proteção ambiental podem ser sintetizados conforme apresentado no Quadro 6.

⁴⁸ Tradução nossa: valores intrínsecos são reconhecidos, e a Natureza passa a ser concebida como sujeito, afastando a ideia de que os seres humanos constituem a única fonte legítima de valor.

⁴⁹ Tradução nossa: Os direitos da natureza podem oferecer benefícios ausentes em outros tipos de proteção jurídica do meio ambiente.

⁵⁰ Tradução nossa: Em janeiro de 2021, pelo menos 185 disposições jurídicas [...] reconhecendo direitos da natureza existiam em 17 países distribuídos por cinco continentes, e outras 50 leis sobre direitos da natureza estavam em tramitação em uma dúzia de países.

⁵¹ Tradução nossa: O direito do sistema terrestre, portanto, incorpora plenamente características centrais do sistema terrestre, como interconectividade, imprevisibilidade, instabilidade e complexidade.

Quadro 6 – Paradigmas da proteção ambiental

Paradigma	Característica	Fundamento
Antropocêntrico	Natureza como recurso	Utilidade humana
Conservacionista	Uso racional	Conservação dos recursos naturais
Ecocêntrico	Natureza como sujeito	Valor intrínseco da natureza
Sistêmico	Interdependência ecológica	Equilíbrio do sistema terrestre

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Leopold (1949), Naess (1973), Stone (1972), Gudynas (2011), Chapron et al. (2019), Kauffman e Martin (2021) e Kotzé et al. (2022).

O Quadro 6 evidencia a transição de paradigmas centrados predominantemente na utilidade humana para perspectivas que reconhecem a interdependência ecológica e o valor intrínseco da natureza. Essa evolução demonstra o progressivo deslocamento do direito ambiental de abordagens antropocêntricas para modelos orientados pela integridade ecológica e pela interdependência entre os sistemas sociais e naturais.

Nesse contexto, os direitos da natureza orientam a proteção dos sistemas ecológicos a partir da necessidade de preservar seus processos essenciais e sua funcionalidade. Essa abordagem implica reconhecer que os sistemas naturais possuem dinâmicas próprias que devem ser respeitadas, exigindo a superação de modelos jurídicos baseados exclusivamente na exploração econômica.

Essa perspectiva encontra concretização em experiências normativas recentes. Nesse sentido, a Constituição da República do Equador (2008, art. 10) estabelece que “La naturaleza será sujeto de aquellos derechos que le reconozca la Constitución.”⁵². Essa disposição representa o reconhecimento jurídico da natureza como sujeito de direitos.

De forma semelhante, a legislação boliviana sobre a Mãe Terra também incorporou fundamentos ecocêntricos ao atribuir proteção jurídica própria aos sistemas naturais, reforçando a transição de uma proteção indireta para uma tutela direta da natureza.

b) Direitos da natureza nas constituições dos países amazônicos

No contexto do constitucionalismo socioambiental latino-americano, a incorporação da proteção da natureza nos textos constitucionais representa um avanço significativo na construção de um novo paradigma ambiental.

A análise desenvolvida neste estudo concentra-se nos países amazônicos com maior densidade normativa, notadamente Equador, Bolívia, Colômbia, Brasil e Venezuela, os quais

⁵² Tradução nossa: A natureza será sujeito daqueles direitos que lhe reconheça a Constituição.

apresentam diferentes formas de incorporação da proteção ambiental em seus textos constitucionais.

No caso do Equador, a Constituição da República do Equador (2008) constitui marco paradigmático ao reconhecer expressamente os direitos da natureza, incorporando ao plano constitucional elementos associados à concepção da Pacha Mama e ao princípio do Buen Vivir (Sumak Kawsay). Nesse sentido, o artigo 71 estabelece que “La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos.”⁵³. Essa formulação revela que a proteção da natureza abrange não apenas sua existência, mas também a continuidade de seus processos ecológicos, reconhecendo a preservação dos ciclos vitais como elemento central da ordem constitucional equatoriana.

No caso da Bolívia, a proteção da natureza é estruturada a partir de fundamentos culturais e normativos específicos associados à concepção da Madre Tierra e ao princípio do Vivir Bien. Diferentemente do modelo equatoriano, centrado no reconhecimento constitucional dos direitos da natureza, a experiência boliviana enfatiza a preservação dos sistemas de vida e das relações de harmonia entre sociedade e ambiente. Nesse sentido, a Lei dos Direitos da Mãe Terra (Lei nº 071/2010) estabelece que a natureza possui direito “A la vida: Es el derecho al mantenimiento de la integridad de los sistemas de vida y los procesos naturales que los sustentan, así como las capacidades y condiciones para su regeneración.”⁵⁴. Essa formulação evidencia que a proteção ambiental ultrapassa a lógica de preservação voltada exclusivamente aos interesses humanos. A utilização da expressão Madre Tierra demonstra a incorporação de elementos das cosmovisões indígenas andinas ao ordenamento jurídico boliviano, aproximando a proteção ambiental de uma perspectiva ecocêntrica e relacional.

Nos demais países analisados, observa-se a ausência de reconhecimento explícito da natureza como sujeito de direitos no plano constitucional, embora haja forte proteção ambiental.

A Colômbia (1991, art. 79) estabelece que “Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo [...]”⁵⁵. Essa previsão vincula a proteção ambiental à garantia das condições necessárias à vida humana e à preservação da qualidade ambiental. Entretanto, o

⁵³ Tradução nossa: A natureza ou Pacha Mama, onde a vida se reproduz e se realiza, tem direito ao respeito integral à sua existência e à manutenção e regeneração de seus ciclos vitais, estrutura, funções e processos evolutivos.

⁵⁴ Tradução nossa: À vida: é o direito à manutenção da integridade dos sistemas de vida e dos processos naturais que os sustentam, bem como das capacidades e condições para sua regeneração.

⁵⁵ Tradução nossa: Todas as pessoas têm direito a gozar de um meio ambiente saudável. A lei garantirá a participação da comunidade nas decisões que possam afetá-lo [...]

reconhecimento da natureza como sujeito de direitos desenvolveu-se principalmente por via jurisprudencial. Nesse sentido, a Corte Constitucional da Colômbia, na Sentencia T-622 de 2016, reconheceu “al río Atrato, su cuenca y afluentes como una entidad sujeto de derechos a la protección, conservación, mantenimiento y restauración a cargo del Estado y las comunidades étnicas [...]”⁵⁶, reconhecendo o rio, sua bacia e os ecossistemas associados como entidades titulares de direitos. Essa decisão evidencia que, mesmo sem previsão constitucional expressa, a proteção da natureza tem sido ampliada por meio da atuação judicial, especialmente mediante o reconhecimento judicial de determinados rios e ecossistemas como entidades titulares de direitos.

No ordenamento jurídico brasileiro, o Brasil (1988, art. 225) estabelece que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado [...]”, qualificando-o como bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida. Essa formulação confere elevada proteção constitucional ao meio ambiente, impondo deveres ao Poder Público e à coletividade para sua defesa e preservação, inclusive em benefício das presentes e futuras gerações. Entretanto, diferentemente das experiências equatoriana e boliviana, o modelo brasileiro permanece estruturado a partir de uma perspectiva predominantemente antropocêntrica, na medida em que a proteção ambiental se fundamenta prioritariamente na garantia da qualidade de vida humana, sem reconhecer expressamente a natureza como sujeito de direitos.

Na experiência venezuelana, a Venezuela (1999, art. 127) estabelece que “Es un derecho y un deber de cada generación proteger y mantener el ambiente en beneficio de sí misma y del mundo futuro”⁵⁷ e que “Toda persona tiene derecho individual y colectivamente a disfrutar de una vida y de un ambiente seguro, sano y ecológicamente equilibrado”⁵⁸. Essas disposições reconhecem a proteção ambiental como dever compartilhado entre Estado, sociedade e gerações presentes e futuras, reforçando também a proteção dos processos ecológicos e da diversidade biológica. Entretanto, embora a Constituição venezuelana apresente elevada densidade normativa em matéria ambiental e incorpore deveres intergeracionais de preservação ecológica, sua estrutura permanece centrada na tutela das condições de vida humana, sem promover uma ruptura explícita com o paradigma antropocêntrico tradicional.

⁵⁶ Tradução nossa: ao rio Atrato, sua bacia e afluentes como entidade titular de direitos à proteção, conservação, manutenção e restauração, sob responsabilidade do Estado e das comunidades étnicas [...].

⁵⁷ Tradução nossa: É um direito e um dever de cada geração proteger e manter o meio ambiente em benefício de si mesma e do mundo futuro.

⁵⁸ Tradução nossa: Toda pessoa tem direito, individual e coletivamente, de desfrutar de uma vida e de um meio ambiente seguro, saudável e ecologicamente equilibrado.

As experiências constitucionais analisadas evidenciam diferentes formas de incorporação da proteção ecológica no constitucionalismo amazônico. Essas distinções podem ser sintetizadas conforme apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 – Modelos constitucionais de proteção da natureza nos países amazônicos

País	Modelo	Característica
Equador	Ecocêntrico	Natureza como sujeito de direitos
Bolívia	Ecocêntrico-cultural	Proteção da Madre Tierra
Colômbia	Jurisprudencial	Reconhecimento judicial da natureza como sujeito de direitos
Brasil	Ambiental-protetivo	Meio ambiente como direito fundamental
Venezuela	Ambiental-protetivo	Dever coletivo e proteção ecológica

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Essa diversidade de abordagens revela que as constituições amazônicas estruturam a proteção ambiental a partir de diferentes modelos jurídicos, que variam do reconhecimento da natureza como sujeito de direitos, como nos casos do Equador e da Bolívia, a perspectivas que asseguram proteção ambiental sem atribuição de personalidade jurídica, como no Brasil e na Venezuela. No caso colombiano, observa-se uma posição intermediária, marcada pela atuação da jurisprudência no reconhecimento pontual de elementos naturais como sujeitos de direitos.

c) A natureza como sujeito de direitos

O reconhecimento da natureza como sujeito de direitos representa uma das principais transformações do constitucionalismo socioambiental contemporâneo, especialmente diante da ampliação de modelos jurídicos que passaram a atribuir tutela própria aos sistemas naturais. Nesse contexto, a incorporação da natureza como sujeito de direitos produz implicações relevantes no campo jurídico e na governança ambiental, ao ampliar as possibilidades de tutela dos ecossistemas e permitir a consideração direta de seus interesses no ordenamento jurídico.

No Brasil, entretanto, observa-se que essa perspectiva ainda enfrenta limitações significativas. Nesse sentido, segundo Pozzetti e Nascimento (2019, p. 448), “sob a justificativa do desenvolvimento sustentável da Pan-Amazônia, a visão antropocêntrica de exploração dos recursos naturais disponíveis tem prevalecido”, evidenciando que, embora existam avanços normativos na proteção ambiental, o ordenamento jurídico brasileiro ainda se encontra fortemente orientado por uma lógica antropocêntrica, o que restringe a plena incorporação de uma abordagem ecocêntrica na tutela dos sistemas naturais.

Essa perspectiva é aprofundada por Acosta (2016, p. 28), ao afirmar que “[...] urge superar o divórcio entre a Natureza e o ser humano. Essa mudança histórica e civilizatória é o maior desafio da Humanidade, se é que não se deseja colocar em risco nossa própria existência.” Essa afirmação evidencia que a incorporação dos direitos da natureza não se restringe ao plano jurídico, mas representa uma transformação mais ampla na forma de organização da sociedade e na relação entre seres humanos e natureza.

No campo da governança ambiental, essa mudança produz efeitos estruturais. Nesse sentido, Kauffman (2021, p. 4) afirma que “Earth jurisprudence aims to fundamentally transform legal, socio-economic, and governance systems, replacing these three destructive ideas with a different paradigm that prioritizes sustaining ecosystem functioning.”⁵⁹ Essa evidência demonstra que o reconhecimento da natureza como sujeito de direitos implica a reorganização das estruturas jurídicas e institucionais a partir de um paradigma orientado pela preservação do funcionamento dos ecossistemas e pela interdependência entre os sistemas humanos e naturais.

No campo crítico, os direitos da natureza também representam um desafio às bases tradicionais do direito. Nesse sentido, Arantes (2011, p. 279) afirma que “as formas de vida encontradas na natureza aparecem destituídas de valor intrínseco; elas só adquirirão valoração quando cumprirem algum papel decisivo para a manutenção da qualidade de vida do ser humano [...]”, indicando que a perspectiva antropocêntrica reduz os elementos naturais à condição de instrumentos voltados à satisfação das necessidades humanas. Essa afirmação evidencia a necessidade de revisão dos fundamentos que historicamente orientaram o direito moderno.

No contexto amazônico, essa concepção assume especial relevância em razão da complexidade ecológica da região e da intensificação das pressões antrópicas sobre seus sistemas naturais. A possibilidade de reconhecer juridicamente elementos naturais — como rios, florestas e ecossistemas — amplia as formas de tutela ambiental e permite considerar diretamente a proteção de seus processos ecológicos e de sua integridade funcional.

Dessa forma, a concepção da natureza como sujeito de direitos representa uma inflexão paradigmática no direito ambiental contemporâneo, na medida em que a proteção ambiental deixa de se limitar à utilidade dos recursos naturais para os seres humanos e passa a reconhecer a natureza como elemento central para a manutenção dos sistemas de vida. Essa transformação

⁵⁹ Tradução nossa: A jurisprudência da Terra busca transformar fundamentalmente os sistemas jurídicos, socioeconômicos e de governança, substituindo essas três ideias destrutivas por um paradigma diferente, que prioriza a manutenção do funcionamento dos ecossistemas.

evidencia a necessidade de desenvolvimento de instrumentos jurídicos compatíveis com a complexidade ecológica de regiões estratégicas como a Amazônia.

2 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E A APTIDÃO NATURAL DA FLORESTA AMAZÔNICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos da sustentabilidade ambiental, abordando a função essencial da natureza como sistema de sustentação da vida, o conceito de desenvolvimento sustentável e os princípios ambientais que orientam a relação equilibrada entre sociedade e meio ambiente. Partindo da compreensão de que a proteção ambiental exige mais do que o reconhecimento da importância ecológica dos sistemas naturais, busca-se analisar os referenciais teóricos que permitem estruturá-la em bases normativas e conceituais consistentes. Nesse contexto, a sustentabilidade é examinada não apenas como um ideal abstrato, mas como um conjunto de limites ecológicos e diretrizes que condicionam a atuação humana sobre o meio ambiente. A partir dessa perspectiva, o capítulo estabelece os fundamentos necessários para a compreensão dos mecanismos de proteção ambiental aplicáveis à Amazônia, especialmente diante da complexidade de seus sistemas ecológicos e das pressões decorrentes de diferentes formas de apropriação e uso de seus recursos naturais.

2.1 A Função essencial da Floresta Amazônica e sua vocação ambiental

A compreensão da sustentabilidade ambiental exige, como ponto de partida, o reconhecimento da natureza como sistema fundamental de sustentação da vida, responsável pela manutenção dos processos ecológicos que garantem a estabilidade dos sistemas ambientais. Essa abordagem implica a superação de concepções fragmentadas, adotando uma perspectiva sistêmica na qual os elementos naturais são compreendidos a partir de suas interdependências.

No campo teórico, essa concepção é desenvolvida por Capra (1996, p. 47), ao afirmar que “O universo material é visto como uma teia dinâmica de eventos inter-relacionados. Nenhuma das propriedades de qualquer parte dessa teia é fundamental [...] a consistência global de suas inter-relações determina a estrutura de toda a teia.”. Essa formulação demonstra que a natureza não pode ser reduzida à soma de partes isoladas, mas deve ser compreendida como um sistema complexo, no qual as propriedades emergentes resultam das relações estabelecidas entre seus elementos. Nessa perspectiva, os sistemas naturais passam a ser entendidos a partir da interdependência ecológica que sustenta seus processos de organização e funcionamento, tornando insuficiente a proteção fragmentada dos ecossistemas diante da complexidade das interações ambientais.

Essa abordagem é aprofundada pela ciência do sistema terrestre. Sob essa perspectiva, Steffen et al. (2015, p. 92) afirmam que “there is a vast amount of evidence that the changes in the structure and functioning of the Earth System [...] are primarily driven by human activities”⁶⁰. Essa constatação evidencia que as atividades humanas passaram a interferir diretamente nos processos de funcionamento do sistema terrestre, tornando insuficiente a compreensão dos sistemas naturais de forma dissociada das ações antrópicas. Nesse contexto, a estabilidade ambiental passa a depender da compatibilização entre desenvolvimento humano e limites ecológicos, exigindo modelos de governança capazes de considerar a interdependência entre sociedade e natureza.

A inserção da atividade econômica nesse contexto reforça essa limitação estrutural. Nessa linha, Daly (2007, p. 9) afirma que “the economy is a subsystem of the larger ecosystem, and the latter is finite, non-growing, and materially closed”⁶¹, indicando que a atividade econômica está condicionada à capacidade de suporte dos sistemas naturais. Essa perspectiva representa uma ruptura com modelos tradicionais de crescimento, ao evidenciar que os processos econômicos dependem diretamente da manutenção das bases ecológicas que sustentam a vida e a própria atividade humana.

Essa limitação é evidenciada pela teoria dos limites planetários. Nesse sentido, Johan Rockström et al. (2009, p. 472) afirmam que “The thresholds in key Earth System processes exist irrespective of peoples’ preferences, values or compromises based on political and socioeconomic feasibility [...]”⁶². Essa proposição estabelece que existem limites ecológicos que delimitam as condições necessárias para a estabilidade do sistema terrestre. Nesse contexto, a sustentabilidade ambiental passa a depender da manutenção das atividades humanas dentro de um espaço ecologicamente seguro, capaz de preservar a resiliência dos sistemas naturais e evitar alterações ambientais potencialmente irreversíveis.

A dimensão estrutural da crise ambiental é destacada por Enrique Leff (2006, p. 290), ao afirmar que “A crise ambiental é o resultado do desconhecimento da lei da entropia, que desencadeou no imaginário economicista a ilusão de um crescimento sem limites, de uma produção infinita. A crise ambiental anuncia o fim desse projeto”. Por meio dessa afirmação, podemos observar que os problemas ambientais decorrem de modelos de desenvolvimento

⁶⁰ Tradução nossa: há uma vasta quantidade de evidências de que as mudanças na estrutura e no funcionamento do Sistema Terrestre [...] são impulsionadas principalmente pelas atividades humanas.

⁶¹ Tradução nossa: a economia é um subsistema do ecossistema maior, e este último é finito, não crescente e materialmente fechado.

⁶² Tradução nossa: Os limiares nos principais processos do Sistema Terrestre existem independentemente das preferências, valores ou compromissos das pessoas baseados na viabilidade política e socioeconômica [...].

baseados na expansão contínua da produção e do consumo, desconsiderando os limites ecológicos dos sistemas naturais. Nesse contexto, a sustentabilidade ambiental exige a superação de concepções econômicas fundamentadas na exploração ilimitada da natureza, reconhecendo a dependência das atividades humanas em relação à integridade ecológica do planeta.

No plano ecológico, a dinâmica dos sistemas naturais reforça essa compreensão. Nesse sentido, Odum (1988, p. 7) afirma que “a comunidade não pode existir sem a circulação de materiais e a corrente de energia no ecossistema”, indicando que a estabilidade ambiental depende da continuidade desses processos. Essa perspectiva evidencia que a natureza opera segundo dinâmicas próprias, cuja interrupção compromete a funcionalidade dos ecossistemas.

A interdependência entre sociedade e natureza também é destacada por Felipe Milanez (2020, p. 19), ao afirmar que “o ambiente que molda a sociedade, é ao mesmo tempo por ela moldado. Por isso se chama essa relação de interdependente.”. Essa formulação evidencia que os sistemas sociais e ecológicos não podem ser compreendidos de forma dissociada, uma vez que as atividades humanas interferem diretamente nas dinâmicas ambientais, ao mesmo tempo em que dependem das condições ecológicas para sua manutenção. Nessa perspectiva, a sustentabilidade ambiental exige o reconhecimento da interdependência entre sociedade e natureza, superando concepções fragmentadas que tratam os sistemas naturais apenas como recursos disponíveis à exploração econômica.

A aplicação desses fundamentos ao contexto amazônico revela que a floresta desempenha funções ecológicas essenciais associadas à manutenção da estabilidade climática, hidrológica e biológica em múltiplas escalas. Em razão de sua elevada complexidade ecológica e de sua capacidade de interação com os processos do sistema terrestre, a Amazônia constitui um dos principais sistemas ambientais do planeta, cuja integridade condiciona o equilíbrio de processos naturais indispensáveis à manutenção da vida.

No contexto amazônico, essa abordagem assume relevância ampliada. Nesse sentido, Nobre et al. (2016, p. 1) afirmam que “the Amazon may have two “tipping points”, namely, temperature increase of 4 °C or deforestation exceeding 40% of the forest area.”⁶³, indicando que a estabilidade ecológica da Amazônia depende da manutenção de limites ambientais capazes de preservar os processos de funcionamento do bioma. Sob essa perspectiva, o avanço do desmatamento e das mudanças climáticas amplia o risco de alterações ambientais

⁶³ Tradução nossa: Amazônia pode possuir dois “pontos de inflexão” (*tipping points*), consistentes no aumento da temperatura em 4 °C ou no desmatamento superior a 40% da área florestal.

potencialmente irreversíveis, evidenciando a elevada sensibilidade da floresta amazônica às pressões antrópicas.

No contexto climático, Malhi et al. (2008, p. 169) afirmam que “Amazonian forests have a substantial influence on regional and global climates.”⁶⁴. Essa constatação evidencia que a floresta amazônica desempenha papel essencial na dinâmica climática em múltiplas escalas, influenciando processos atmosféricos indispensáveis à manutenção do equilíbrio ambiental. Nessa perspectiva, a preservação da integridade ecológica da Amazônia torna-se condição necessária para a estabilidade climática regional e global.

A relevância funcional da natureza também se expressa na prestação de serviços ambientais. Nesse sentido, Leal Filho et al. (2025, p. 2) afirmam que “It is therefore considered a critical ecosystem because it provides numerous ecosystem services [...]”⁶⁵, indicando a importância ecológica da floresta amazônica para a manutenção de processos ambientais essenciais. Essa perspectiva demonstra que a relevância do bioma transcende sua dimensão territorial, abrangendo funções ecológicas indispensáveis à estabilidade climática, hidrológica e biológica em múltiplas escalas.

De forma complementar, Costanza et al. (1998, p. 6) afirmam que “[...] we can consider the general class of natural capital as essential to human welfare. Zero natural capital implies zero human welfare because it is not feasible to substitute [...]”⁶⁶, indicando que o bem-estar humano depende diretamente da manutenção do capital natural. Essa formulação evidencia que os sistemas naturais constituem bases indispensáveis à manutenção da vida humana, não sendo plenamente substituíveis por processos artificiais ou econômicos. Nessa perspectiva, a preservação do capital natural representa condição necessária para a continuidade do bem-estar humano e para a estabilidade dos processos ecológicos que sustentam as atividades sociais e econômicas.

Os principais fundamentos teóricos da função ambiental da natureza podem ser sintetizados conforme apresentado no Quadro 8.

⁶⁴ Tradução nossa: As florestas amazônicas exercem influência substancial sobre os climas regional e global.

⁶⁵ Tradução nossa: É, portanto, considerado um ecossistema crítico porque fornece numerosos serviços ecossistêmicos [...].

⁶⁶ Tradução nossa: [...] podemos considerar a classe geral do capital natural como essencial para o bem-estar humano. Capital natural igual a zero implica bem-estar humano igual a zero, porque não é viável substituí-lo [...].

Quadro 8 – Fundamentos teóricos da função ambiental da natureza

Autor	Contribuição	Implicação
Capra (1996)	Sistemas vivos integrados	Interdependência ecológica
Steffen et al. (2015)	Sistema terrestre	Ação humana no sistema terrestre
Daly (2007)	Economia como subsistema ecológico	Limites ecológicos do desenvolvimento
Rockström et al. (2009)	Limites planetários	Limites ecológicos do sistema terrestre
Leff (2006)	Crise da racionalidade econômica	Revisão dos modelos de desenvolvimento
Odum (1988)	Fluxos de energia e ciclos ecológicos	Funcionamento sistêmico dos ecossistemas
Nobre et al. (2016)	Tipping points amazônicos	Risco de colapso ecológico
Malhi et al. (2008)	Regulação climática amazônica	Importância climática global
Costanza et al. (1998)	Capital natural e serviços ecossistêmicos	Dependência humana dos sistemas naturais

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base nos autores citados.

A articulação dessas abordagens permite compreender que a natureza possui uma vocação ambiental intrínseca, caracterizada pela manutenção dos processos ecológicos que sustentam a vida. No caso da Amazônia, essa vocação manifesta-se na regulação climática, na manutenção do ciclo hidrológico, na conservação da biodiversidade e na prestação de serviços ambientais em escala global.

Dessa forma, a sustentabilidade ambiental exige o reconhecimento da função ecológica essencial desempenhada pelos sistemas naturais, especialmente pela Amazônia, cuja estabilidade condiciona processos climáticos, hidrológicos e ecológicos em múltiplas escalas. Nesse contexto, a proteção ambiental deixa de representar apenas uma estratégia de conservação de recursos naturais, passando a constituir condição indispensável para a manutenção da estabilidade ecológica e da própria continuidade das condições que sustentam a vida.

2.2 Sustentabilidade ambiental e desenvolvimento sustentável

A compreensão da sustentabilidade ambiental, conforme delineada no item anterior, fundamenta-se na existência de limites ecológicos que condicionam a atuação humana sobre o meio ambiente. Nesse contexto, o conceito de desenvolvimento sustentável emerge como tentativa de compatibilizar a utilização dos recursos naturais com a necessidade de preservação dos sistemas ecológicos. Sua análise, contudo, exige a superação de abordagens meramente

descritivas, sendo necessário examinar seus fundamentos, sua evolução e suas limitações diante da dinâmica ecológica e das transformações ambientais contemporâneas.

A consolidação da temática ambiental no plano internacional ocorre a partir da Conferência de Estocolmo. Nesse sentido, a Organização das Nações Unidas (1972, Princípio 1) estabelece que “Man has the fundamental right to freedom, equality and adequate conditions of life, in an environment of a quality that permits a life of dignity and well-being [...]”⁶⁷. Essa formulação introduz a proteção ambiental no campo dos direitos fundamentais, ao reconhecer o meio ambiente ecologicamente equilibrado como condição indispensável à vida humana digna. Entretanto, essa abordagem permanece estruturada sob uma lógica predominantemente antropocêntrica, na medida em que a proteção da natureza é justificada principalmente em função de sua utilidade para o ser humano.

O avanço desse debate ocorre com a formulação do conceito de desenvolvimento sustentável no Relatório Brundtland. Nesse sentido, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD, 1987, p. 43) afirma que “Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.”⁶⁸ Essa definição introduz a dimensão intergeracional na análise do desenvolvimento, estabelecendo que a utilização dos recursos naturais deve considerar seus efeitos sobre as gerações futuras. Trata-se de um marco conceitual relevante, ao propor a articulação entre crescimento econômico e preservação ambiental.

A ampliação do debate ambiental também passou a incorporar múltiplas dimensões da sustentabilidade. Nesse sentido, Sachs (2004, p. 15) afirma que “Os cinco pilares do desenvolvimento sustentável são: social [...] ambiental [...] territorial [...] econômico [...] político”. Essa formulação evidencia que a sustentabilidade ultrapassa a dimensão estritamente ecológica, passando a abranger aspectos sociais, econômicos, territoriais e institucionais. Contudo, essa ampliação também revela a complexidade de sua operacionalização, uma vez que a conciliação entre essas diferentes dimensões nem sempre ocorre de forma equilibrada, especialmente em contextos de desigualdade e pressão econômica.

Para Pozzetti e Carvalho (2019, p. 488), “a sustentabilidade ambiental nada mais é que desenvolver a capacidade dos ecossistemas de se manterem saudáveis, diante da sua utilização pelos seres humanos”, indicando que a sustentabilidade está diretamente relacionada à

⁶⁷ Tradução nossa: O homem tem o direito fundamental à liberdade, à igualdade e ao desfrute de condições de vida adequadas em um meio ambiente de qualidade tal que lhe permita levar uma vida digna e gozar de bem-estar [...].

⁶⁸ Tradução nossa: Desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem suas próprias necessidades.

preservação da funcionalidade dos sistemas naturais, mesmo em contextos de uso econômico. Essa compreensão implica reconhecer a necessidade de gestão adequada dos recursos naturais, de modo a evitar a degradação dos processos ecológicos essenciais à manutenção do equilíbrio ambiental.

A análise da sustentabilidade a partir dos limites biofísicos do sistema terrestre aprofunda essa discussão. Nesse sentido, Johan Rockström et al. (2009, p. 474) afirmam que “Here we present a novel concept, planetary boundaries, for estimating a safe operating space for humanity with respect to the functioning of the Earth System.”⁶⁹ Essa formulação evidencia que a sustentabilidade depende da observância de limites ecológicos capazes de assegurar a estabilidade e a resiliência do sistema terrestre. Nessa perspectiva, a sustentabilidade deixa de representar apenas um objetivo normativo e passa a ser compreendida como a necessidade de manter as atividades humanas dentro de um espaço ecologicamente seguro.

A compreensão da sustentabilidade a partir dos limites planetários foi posteriormente aprofundada por novos estudos sobre o sistema terrestre. Nesse sentido, Richardson et al. (2023, p. 1) afirmam que “Planetary boundaries bring a scientific understanding of anthropogenic global environmental impacts into a framework that calls for considering the state of Earth system as a whole.”⁷⁰ Essa formulação evidencia que os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas devem ser compreendidos de maneira integrada, considerando as interações entre os diferentes processos ecológicos que compõem o sistema terrestre. Nessa perspectiva, a sustentabilidade deixa de representar apenas um objetivo normativo e passa a exigir abordagens sistêmicas capazes de preservar a estabilidade ecológica global.

A crítica à sustentabilidade baseada na compatibilização entre crescimento econômico e proteção ambiental é aprofundada por Daly (2015, p. 1), ao afirmar que “The economy [...] is an open subsystem of the larger ecosphere, which is finite [...]”⁷¹. Essa afirmação evidencia que a atividade econômica está condicionada à capacidade de suporte dos sistemas naturais, tornando incompatível a ideia de crescimento econômico ilimitado em um planeta ecologicamente finito. De forma complementar, Leff (2011, p. 322) afirma que “as causas profundas da crise ambiental [...] remetem a um questionamento da racionalidade que as gera e à construção de uma nova racionalidade.”, indicando que os problemas ambientais decorrem de um modelo de desenvolvimento fundamentado em padrões econômicos e produtivos que

⁶⁹ Tradução nossa: Aqui apresentamos um novo conceito, os limites planetários, para estimar um espaço operacional seguro para a humanidade em relação ao funcionamento do sistema terrestre.

⁷⁰ Tradução nossa: Os limites planetários trazem uma compreensão científica dos impactos ambientais globais antropogênicos para uma estrutura que exige considerar o estado do sistema terrestre como um todo.

⁷¹ Tradução nossa: A economia [...] é um subsistema aberto da ecosfera mais ampla, que é finita [...].

desconsideram os limites ecológicos. Essas abordagens demonstram que a sustentabilidade exige transformações estruturais na organização das atividades econômicas.

No contexto da Amazônia, essas contradições tornam-se ainda mais evidentes. A floresta amazônica desempenha funções essenciais na regulação climática, no ciclo hidrológico e na conservação da biodiversidade, constituindo um dos principais sistemas de suporte à vida no planeta. Entretanto, a intensificação das atividades antrópicas tem comprometido sua integridade, evidenciando a dificuldade de compatibilizar modelos de desenvolvimento baseados na exploração intensiva com a manutenção dos processos ecológicos.

Os principais marcos teóricos relacionados ao desenvolvimento sustentável podem ser organizados de forma a evidenciar sua evolução no tempo, bem como suas diferentes dimensões analíticas. Para fins de sistematização, esses marcos são apresentados em ordem cronológica, o que permite visualizar a progressiva incorporação de elementos conceituais, normativos e críticos na construção da sustentabilidade ambiental, conforme sintetizado no Quadro 9.

Quadro 9 – Marcos teóricos e limitações do desenvolvimento sustentável

Marco	Contribuição	Limitação
Estocolmo (1972)	Direito ao meio ambiente	Predominância Antropocêntrica
Brundtland (1987)	Dimensão intergeracional	Generalidade conceitual
Sachs (2004)	Integração multidimensional da sustentabilidade	Dificuldade de conciliação entre dimensões
Rockström et al. (2009)	Limites planetários e espaço operacional seguro	Ênfase predominante nos limites biofísicos
Daly (2015)	Economia como subsistema ecológico	Limite ao crescimento econômico
Leff (2011)	Crítica à racionalidade econômica	Necessidade de transformação estrutural
Richardson et al. (2023)	Atualização da crise dos limites planetários	Evidência de agravamento sistêmico

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base nos autores citados.

O Quadro 9 evidencia que o conceito de desenvolvimento sustentável passou por um processo de ampliação teórica e complexificação analítica ao longo do tempo. Inicialmente associado à proteção ambiental sob perspectiva predominantemente antropocêntrica, o debate incorporou progressivamente dimensões sociais, econômicas, ecológicas e institucionais, bem como críticas relacionadas aos limites biofísicos do planeta e à racionalidade econômica dominante. Essa evolução demonstra que a sustentabilidade ambiental não pode ser compreendida de forma isolada ou exclusivamente normativa, exigindo abordagens sistêmicas e interdisciplinares compatíveis com a complexidade das relações entre sociedade e natureza.

Dessa forma, a sustentabilidade ambiental deve ser compreendida não apenas como um princípio orientador, mas como um conjunto de limites e diretrizes que condicionam a relação entre sociedade e natureza. Isso implica reconhecer que a proteção ambiental não pode ser subordinada exclusivamente a critérios econômicos, devendo considerar a integridade dos sistemas ecológicos como elemento central para a manutenção do equilíbrio ambiental e da própria qualidade de vida humana.

Assim, o conceito de desenvolvimento sustentável, embora relevante, deve ser analisado de forma crítica, evidenciando suas potencialidades e limitações, especialmente em contextos de elevada complexidade ambiental, como a Amazônia. Nesse contexto, torna-se necessário avançar na análise dos princípios jurídicos e ambientais que orientam a concretização da sustentabilidade ambiental.”

2.3 Princípios ambientais e a regulação da relação entre homem e natureza

Para que a sustentabilidade ambiental deixe de ser apenas um conceito e passe a orientar decisões concretas, é necessário estabelecer parâmetros que guiem a relação entre sociedade e natureza. Nesse contexto, os princípios ambientais cumprem papel fundamental, pois orientam tanto a atuação do Estado quanto as atividades humanas sobre o meio ambiente.

Os princípios constituem fundamentos orientadores da organização jurídica e social, funcionando como diretrizes para a interpretação e aplicação das normas. Seguindo essa linha de raciocínio, Nascimento e Pozzetti (2021, p. 3 e 4) destacam que:

Os Princípios fizeram parte do processo de integração das normas jurídicas; entretanto, na contemporaneidade, possuem força normativa, sendo considerados “normas” jurídicas. Não podem ser considerados “leis”, mas possuem força normativa para subsidiar a existência, o surgimento das leis; pois uma lei que surge no universo jurídico, contrariando princípios fundamentais, está fadada à revogação.

Na mesma linha, Machado (2014, p. 58-59) afirma que “O Direito Ambiental não ignora o que cada matéria tem de específico, mas busca interligar estes temas com a argamassa da identidade dos instrumentos jurídicos de prevenção e de reparação, de informação, de monitoramento e de participação”. Esse entendimento evidencia que os princípios ambientais exercem função orientadora na interpretação e aplicação das normas ambientais, especialmente diante de conflitos entre desenvolvimento econômico e proteção ecológica.

A partir dessa base, destacam-se alguns princípios centrais que orientam a atuação ambiental. O princípio da prevenção estabelece que a atuação deve ocorrer antes da ocorrência do dano. Nesse sentido, Milaré (2015, p. 264) afirma que “o princípio da prevenção tem como objetivo impedir a ocorrência de danos ao meio ambiente, através da imposição de medidas

acautelatórias, antes da implantação de empreendimentos e atividades consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras”. Essa perspectiva demonstra que, diante de riscos conhecidos, a atuação preventiva busca reduzir os danos ecológicos por meio da adoção antecipada de medidas de proteção.

Já o princípio da precaução é aplicado em situações de incerteza científica. A Declaração do Rio de Janeiro (ONU, 1992, Princípio 15) dispõe que “quando houver ameaça de danos sérios ou irreversíveis, a ausência de certeza científica absoluta não deve ser utilizada como razão para o adiamento de medidas eficazes economicamente viáveis para prevenir a degradação ambiental”. Essa diretriz evidencia que, mesmo diante de incertezas científicas, deve-se priorizar a adoção de medidas voltadas à proteção ambiental quando houver risco de danos graves ou irreversíveis.

Além dos princípios preventivos clássicos, o direito ambiental também desenvolveu critérios interpretativos voltados à aplicação protetiva das normas ambientais. Nesse contexto, Cappelli (2021, p. 115) afirma que “*In dubio pro natura* é um princípio instrumental, interpretativo, metodológico ou postulado normativo-aplicativo para a utilização da norma mais benéfica ao meio ambiente, em caso de dúvida, obscuridade ou incerteza jurídica”. Entende-se que, diante de dúvidas quanto aos possíveis impactos ecológicos, deve-se adotar a interpretação mais favorável à proteção ambiental. O princípio também encontra fundamento na proteção ambiental como direito fundamental, considerando que o artigo 225 da Constituição Federal de 1988 estabelece que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida” (BRASIL, 1988, art. 225).

Outro princípio relevante é o do poluidor-pagador. Nesse sentido, Costa (2026, p. 21) afirma que “Aquele que degrada o meio ambiente deve arcar com os ônus decorrentes dessa atividade, responsabilizando-se pelos custos destinados à prevenção e reparação dos danos ao ambiente”. Esse entendimento encontra respaldo no artigo 4º, inciso VII, da Lei nº 6.938/1981, que prevê a obrigação de recuperação e indenização dos danos ambientais causados pelo poluidor. Dessa forma, os custos decorrentes da degradação ambiental devem ser assumidos pelos agentes responsáveis pela atividade poluidora, evitando sua transferência para a coletividade.

Esse entendimento também é adotado pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 1972, p. 12 e 13), segundo a qual “The polluter should bear the expenses of carrying out the above mentioned measures decided by public authorities

to ensure that the environment is in an acceptable state”⁷². Na prática, esse princípio busca corrigir falhas de mercado por meio da incorporação das externalidades ambientais, atribuindo aos agentes poluidores os custos associados à degradação causada por suas atividades.

Outro princípio relevante é o do protetor-recebedor, que estabelece a necessidade de reconhecer e valorizar economicamente aqueles que contribuem para a conservação ambiental. Esse princípio está diretamente relacionado aos mecanismos de pagamento por serviços ambientais, pois busca incentivar práticas voluntárias de preservação por meio de instrumentos econômicos. Nesse sentido, Hupffer, Weyermüller e Waclawovsky (2011, p. 103) afirmam que “é de ser remunerado [...] o agente que adotou a conduta ambientalmente positiva”. Essa lógica demonstra que os mecanismos de pagamento por serviços ambientais constituem instrumentos voltados à valorização econômica da conservação ambiental e ao incentivo de práticas de proteção dos recursos naturais.

O princípio do desenvolvimento sustentável atua, por sua vez, como eixo integrador, promovendo o equilíbrio entre crescimento econômico, preservação ambiental e justiça social. Esse princípio orienta a busca por soluções que considerem simultaneamente as diferentes dimensões da sustentabilidade. Nesse sentido, a Declaração do Rio de Janeiro (ONU, 1992, Princípio 4) estabelece que “A proteção ambiental constituirá parte integrante do processo de desenvolvimento e não pode ser considerada isoladamente deste”. Essa concepção evidencia que a sustentabilidade exige a integração entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental, superando perspectivas fragmentadas da relação entre sociedade e natureza.

A análise desses princípios evidencia que eles atuam de forma integrada, orientando tanto a prevenção quanto a responsabilização por danos ambientais. Com base nessa compreensão, suas principais funções podem ser sintetizadas conforme apresentado no Quadro 10.

⁷² Tradução nossa: O poluidor deve arcar com os custos da implementação das medidas anteriormente mencionadas, determinadas pelas autoridades públicas, para assegurar que o meio ambiente permaneça em um estado aceitável.

Quadro 10 – Princípios ambientais e suas funções normativas

Princípio	Função	Aplicação
Prevenção	Evitar danos certos	Atuação antecipada
Precaução	Gerir riscos incertos	Decisão sob incerteza
<i>In dubio pro natura</i>	Orientação interpretativa	Decisão favorável à proteção ambiental
Poluidor-pagador	Responsabilização	Internalização de custos
Protetor-recebedor	Incentivo à conservação	Valoração ambiental
Desenvolvimento sustentável	Integração	Equilíbrio entre dimensões

Fonte: Elaboração própria (2026), com base em Milaré (2015), Machado (2014), Cappelli (2021), Hupffer, Weyermüller e Waclawovsky (2011), OECD (1972) e ONU (1992).

O Quadro 10 demonstra que os princípios ambientais possuem funções complementares, articulando prevenção, gestão de riscos, responsabilização por danos ambientais e orientação interpretativa em contextos de incerteza científica. Essa organização demonstra que a atuação ambiental não se limita à reparação do dano já consumado, abrangendo também mecanismos preventivos, precaucionais e interpretativos voltados à máxima proteção dos ecossistemas.

A importância desses princípios torna-se ainda mais evidente quando analisados no contexto da responsabilização por danos ambientais. No ordenamento jurídico brasileiro, a responsabilidade ambiental possui natureza objetiva. A Lei nº 6.938/1981 estabelece, em seu artigo 14, § 1º, que “é o poluidor obrigado, independentemente da existência de culpa, a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros, afetados por sua atividade”. Isso implica que a obrigação de reparação decorre da existência do dano e da relação entre a atividade desenvolvida e os impactos ambientais causados, independentemente da comprovação de culpa.

De forma complementar, Machado (2013, p. 416) afirma que “No § 3º do art. 225 consta a obrigação de reparar o dano causado ao meio ambiente. Acentua este parágrafo que a obrigação de reparar é independente da aplicação de sanções penais e administrativas”. Essa interpretação evidencia que a responsabilização ambiental possui caráter amplo, abrangendo não apenas sanções jurídicas, mas também a obrigação de recomposição do equilíbrio ecológico sempre que possível.

Apesar da existência desses princípios, observa-se que, na prática, muitos danos ambientais continuam ocorrendo. Isso demonstra que os instrumentos jurídicos e econômicos existentes ainda apresentam limitações quanto à efetiva promoção da conservação ambiental, especialmente no que se refere à internalização dos custos da degradação.

Parte dessas limitações pode ser associada à própria estrutura tradicional do ordenamento jurídico, historicamente orientada por uma perspectiva antropocêntrica, na qual a

natureza é predominantemente compreendida como objeto de proteção. Nesse contexto, a tutela ambiental permanece frequentemente condicionada a interesses humanos diretos, o que pode limitar a efetividade da proteção ecológica.

Essa realidade é reforçada por evidências científicas. Rockström et al. (2009, p. 4) afirmam que “humans are effectively pushing the planet outside the Holocene range of variability”⁷³, indicando que as atividades humanas vêm ultrapassando os limites ecológicos responsáveis pela estabilidade do sistema terrestre. Essa análise evidencia que a intensificação das pressões antrópicas compromete a capacidade de resiliência dos ecossistemas e amplia os riscos de alterações ambientais potencialmente irreversíveis.

Do ponto de vista econômico, Stern (2007, p. iv) afirma que “Economists describe human-induced climate change as an ‘externality’ and the global climate as a ‘public good’”⁷⁴. Essa abordagem demonstra que os impactos ambientais ultrapassam os mecanismos tradicionais de mercado, exigindo instrumentos capazes de internalizar os custos ecológicos associados às atividades econômicas.

No contexto amazônico, essa problemática assume proporções ainda mais relevantes, uma vez que os impactos ambientais ultrapassam a escala local e afetam processos ecológicos em nível regional e global. Essa dinâmica demonstra uma assimetria na distribuição dos custos e benefícios ambientais, considerando que os serviços ambientais são amplamente compartilhados, enquanto os custos da conservação permanecem concentrados.

Nesse sentido, os princípios ambientais, especialmente o do poluidor-pagador e do protetor-recebedor, permitem compreender a necessidade de internalização das externalidades ambientais e de valorização econômica da conservação. Entre os instrumentos voltados à concretização desse equilíbrio, destacam-se os mecanismos de pagamento por serviços ambientais, que reconhecem economicamente os benefícios gerados pela manutenção dos ecossistemas. Essa abordagem será aprofundada nos capítulos seguintes, especialmente na proposição do modelo de remuneração baseado na capacidade econômica das unidades federativas.

⁷³ Tradução nossa: as atividades humanas estão efetivamente conduzindo o planeta para além dos limites de variabilidade característicos do Holoceno.

⁷⁴ Tradução nossa: Os economistas descrevem a mudança climática induzida pelo ser humano como uma ‘externalidade’ e o clima global como um ‘bem público’.

2.4 A necessidade de manutenção do equilíbrio ecológico e seus limites

Além dos princípios anteriormente analisados, a manutenção do equilíbrio entre sociedade e natureza constitui elemento central para a sustentabilidade ambiental, especialmente em contextos de elevada complexidade ecológica, como a Amazônia. Contudo, esse equilíbrio não pode ser compreendido como uma condição estática, mas como um processo dinâmico condicionado pelos limites biofísicos dos sistemas naturais. Nessa perspectiva, a sustentabilidade exige a construção de modelos de desenvolvimento compatíveis com a capacidade de suporte dos ecossistemas, o que implica a revisão das formas convencionais de utilização dos recursos naturais.

A crescente preocupação com os limites ecológicos do desenvolvimento tem reforçado a compreensão de que a sustentabilidade exige transformações estruturais na relação entre economia e meio ambiente. Nesse sentido, Veiga (2019, p. 26) afirma que “Para a sustentabilidade, é necessária uma macroeconomia que, além de reconhecer os sérios limites naturais à expansão das atividades econômicas, rompa com a lógica social do consumismo”. Essa compreensão demonstra que a sustentabilidade não se limita à adoção de medidas pontuais, mas implica a reconfiguração dos padrões de produção e consumo que estruturam a dinâmica econômica. Trata-se, portanto, de uma mudança paradigmática que exige a incorporação de condicionantes ecológicos à lógica do desenvolvimento.

Essa transformação também envolve uma dimensão ética fundamental. Nesse sentido, Boff (2012, p. 123) afirma que “Da Terra recebemos tudo o que precisamos para viver. Isso implica em nós um dever de gratidão e retribuição em termos de manutenção das condições ecológicas que lhe garantem fazer o que sempre fez para nós e para todos os demais seres vivos”. Essa abordagem sugere que a proteção ambiental depende de uma reorientação dos valores que estruturam a ação humana, evidenciando que a crise ambiental não pode ser enfrentada exclusivamente por instrumentos técnicos ou normativos, mas exige uma transformação nas bases culturais da relação com o meio ambiente.

A compreensão da sustentabilidade como processo multidimensional é aprofundada por diferentes abordagens teóricas. Nesse sentido, Sen (2000, p. 28) afirma que “A concepção adequada de desenvolvimento deve ir muito além da acumulação de riqueza e do crescimento do Produto Nacional Bruto e de outras variáveis relacionadas à renda”. Essa análise demonstra que o desenvolvimento não pode ser reduzido ao desempenho econômico, devendo considerar também as condições sociais, humanas e ambientais necessárias à ampliação das capacidades

individuais e ao bem-estar coletivo. Nesse contexto, a qualidade ambiental constitui elemento essencial para a efetivação de um desenvolvimento sustentável.

De forma complementar, Morin e Kern (2003, p. 63) afirmam que “não podemos mais considerar como entidades claramente separadas, impermeáveis umas às outras, homem, natureza, vida, cosmos”. Essa perspectiva reforça a compreensão de que sociedade e natureza mantêm relações de interdependência, impossibilitando análises fragmentadas dos sistemas ecológicos e sociais. Assim, a sustentabilidade exige abordagens capazes de reconhecer a complexidade e a interdependência entre os sistemas sociais, econômicos e ecológicos.

No plano científico, a intensificação da crise ambiental em escala global reforça a centralidade desses desafios. Nesse sentido, o IPCC (2021, p. 10) afirma que “Climate change is already affecting every inhabited region across the globe.”⁷⁵ Essa constatação demonstra que os impactos ambientais assumem dimensão global e afetam diferentes regiões de forma interdependente, indicando que a manutenção do equilíbrio ecológico depende de ações coordenadas em múltiplas escalas.

A sustentabilidade exige, igualmente, a consideração da resiliência dos sistemas ecológicos. Nesse sentido, Folke et al. (2010, p. 2) afirmam que “Social–ecological resilience is about people and nature as interdependent systems.”⁷⁶ Essa afirmação evidencia que a manutenção da resiliência ecológica depende da capacidade adaptativa dos sistemas socioecológicos diante das mudanças ambientais, reforçando a necessidade de estratégias capazes de promover a adaptação e a manutenção das funções ecológicas diante das mudanças ambientais.

A articulação entre economia e ecologia também tem sido analisada a partir da perspectiva dos limites do crescimento. Nesse sentido, Raworth (2017, p. 11) afirma que “Human activity is putting unprecedented stress on Earth’s life-giving systems.”⁷⁷ Essa abordagem evidencia que o desenvolvimento humano está condicionado a limites ecológicos do sistema terrestre que não podem ser ultrapassados sem comprometer a estabilidade dos sistemas naturais.

No contexto amazônico, essas questões assumem relevância ainda mais acentuada. Nesse sentido, Lapola et al. (2023, p. 13) afirmam que “the loss of ecosystem services due to extreme climate change in the Amazon may induce regional economy losses of US\$ 7.7 trillion

⁷⁵ Tradução nossa: As mudanças climáticas já estão afetando todas as regiões habitadas do planeta.

⁷⁶ Tradução nossa: A resiliência socioecológica diz respeito às pessoas e à natureza como sistemas interdependentes.

⁷⁷ Tradução nossa: A atividade humana está impondo uma pressão sem precedentes sobre os sistemas vitais da Terra.

in a period of 30 years.”⁷⁸ Essa constatação demonstra que a degradação ambiental compromete simultaneamente a integridade ecológica e a estabilidade econômica, indicando que a conservação da floresta constitui não apenas uma exigência ambiental, mas também uma condição para a sustentabilidade econômica.

Os principais elementos que estruturam os limites do equilíbrio ecológico podem ser sintetizados conforme apresentado no Quadro 11.

Quadro 11 – Dimensões do equilíbrio ecológico e da sustentabilidade

Dimensão	Elemento	Implicação	Refencial Teórico
Ecológica	Limites biofísicos	Condicionamento do desenvolvimento	Veiga (2019); Raworth (2017)
Econômica	Uso dos recursos	Necessidade de racionalidade	Veiga (2019); Sen (2000)
Ética	Valores ambientais	Mudança cultural	Boff (2012)
Social	Qualidade ambiental	Bem-estar humano	Sen (2000)
Sistêmica	Interdependência	Integração socioecológica	Morin e Kern (2003)
Resiliência	Capacidade adaptativa	Estabilidade ecológica	Folke et al. (2010)
Climática	Mudanças climáticas globais	Necessidade de ações coordenadas	IPCC (2021)
Amazônica	Serviços ecossistêmicos	Impactos econômicos regionais	Lapola et al. (2023)

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O Quadro 11 evidencia que a manutenção do equilíbrio ecológico depende da integração de múltiplas dimensões inter-relacionadas, envolvendo aspectos ecológicos, econômicos, sociais, éticos e climáticos. A síntese apresentada demonstra que a sustentabilidade não pode ser compreendida de forma restrita à preservação ambiental isolada, mas exige a articulação entre limites ecológicos, racionalidade econômica, capacidade adaptativa e reconhecimento da interdependência entre sociedade e natureza. Observa-se que a degradação dos sistemas naturais produz consequências que ultrapassam os limites ambientais, alcançando dimensões sociais e econômicas em escala regional e global, especialmente no contexto amazônico.

Dessa forma, a manutenção do equilíbrio ecológico revela-se condição indispensável para a sustentabilidade, ao mesmo tempo em que expõe os limites dos modelos tradicionais de desenvolvimento quando dissociados dos condicionantes ecológicos. A intensificação das mudanças climáticas, da degradação ambiental e da pressão sobre os recursos naturais evidencia que o crescimento econômico não pode ocorrer de maneira incompatível com a capacidade de suporte dos ecossistemas, especialmente em regiões de elevada relevância ambiental, como a Amazônia.

⁷⁸ Tradução nossa: a perda de serviços ecossistêmicos decorrente das mudanças climáticas extremas na Amazônia pode induzir perdas econômicas regionais de US\$ 7,7 trilhões em um período de 30 anos.

Nesse contexto, torna-se necessária a implementação de mecanismos capazes de compatibilizar a proteção dos sistemas naturais com as dinâmicas econômicas, não apenas por meio da restrição à degradação, mas também pelo incentivo às práticas conservacionistas. Essa perspectiva reforça a importância de instrumentos voltados ao reconhecimento e à valorização dos serviços ecossistêmicos prestados pela floresta amazônica, especialmente diante de sua relevância climática, hidrológica e ecológica em escala nacional e global. Assim, a valorização econômica desses serviços apresenta-se como importante estratégia para estimular a conservação ambiental e fortalecer modelos de desenvolvimento compatíveis com os limites ecológicos, tema que será aprofundado nos capítulos seguintes.

3 CONSEQUÊNCIAS AMBIENTAIS DA DERRUBADA DA FLORESTA E DA UTILIZAÇÃO PREDATÓRIA DOS RECURSOS NATURAIS

A análise desenvolvida no Capítulo 2 evidenciou que a sustentabilidade ambiental, embora fundamental, apresenta limitações quando não acompanhada de mecanismos capazes de compatibilizar a proteção dos sistemas naturais com as dinâmicas econômicas. Nesse contexto, a persistência do desmatamento revela limitações dos instrumentos institucionais, econômicos e regulatórios atualmente existentes, resultando em processos de degradação ambiental que comprometem a estabilidade dos sistemas ecológicos.

A continuidade dessas dinâmicas evidencia que a degradação ambiental na Amazônia não se restringe a impactos ecológicos isolados, mas expressa um modelo estrutural de utilização do território baseado na exploração intensiva dos recursos naturais e na distribuição assimétrica dos custos ambientais. Dessa forma, os benefícios econômicos associados à exploração da floresta frequentemente permanecem dissociados dos impactos ambientais e sociais produzidos pela degradação dos ecossistemas amazônicos.

Dessa forma, este capítulo examina os impactos decorrentes da derrubada da floresta e da utilização predatória dos recursos naturais, evidenciando como a ruptura do equilíbrio ecológico se traduz em efeitos concretos sobre o clima, a biodiversidade e os serviços ambientais, ao mesmo tempo em que revela implicações econômicas, sociais e institucionais associadas a esses processos.

3.1 Impactos ambientais da exploração predatória da floresta

A exploração predatória da floresta amazônica produz impactos ambientais que ultrapassam a perda imediata da cobertura vegetal, afetando processos ecológicos essenciais para a estabilidade climática, hidrológica e biogeoquímica do bioma. A remoção da vegetação compromete mecanismos naturais de regulação ambiental, alterando a dinâmica das chuvas, os fluxos de umidade, a fertilidade dos solos e o equilíbrio energético da superfície terrestre. A intensificação do desmatamento e das queimadas amplia a vulnerabilidade da floresta a processos de degradação sistêmica, com repercussões ambientais, sociais e econômicas em escala regional e global.

Nesse sentido, Marengo (2006, p. 2) afirma que “The recycling of local evaporation and precipitation by the forest accounts for a sizable portion of the regional water budget.”⁷⁹, evidenciando que a vegetação atua como componente ativo do ciclo hidrológico amazônico. Essa constatação indica que a dinâmica das chuvas depende diretamente da integridade da cobertura florestal, cuja remoção compromete a capacidade do sistema de sustentar a própria precipitação.

De forma complementar, Costa e Foley (2000, p. 30) afirmam que “Deforestation makes the simulated precipitation decrease by 0.73 mm day⁻¹ over the region.”⁸⁰, indicando que a remoção da cobertura vegetal reduz significativamente a precipitação regional. Tal dinâmica demonstra que a perda da floresta compromete a capacidade de geração e reciclagem de umidade, afetando os regimes pluviométricos em diferentes escalas.

A circulação atmosférica associada à Amazônia também desempenha papel fundamental no transporte de umidade. Nesse contexto, Nobre, Sampaio e Salazar (2007, p. 24) afirmam que “a redução na intensidade dos ventos alísios transportando umidade do oceano para a Amazônia” está associada às alterações climáticas observadas na região, evidenciando a importância dos fluxos atmosféricos de umidade para a manutenção do equilíbrio hidrológico amazônico. Essa dinâmica revela que a degradação da floresta produz efeitos que ultrapassam seus limites territoriais, influenciando sistemas climáticos e hidrológicos em diferentes regiões do continente.

Figura 1. Rios voadores



Fonte: Adaptado de FUNBIO (s.d.).

⁷⁹ Tradução nossa: A reciclagem da evaporação local e da precipitação pela floresta representa uma parcela significativa do balanço hídrico regional.

⁸⁰ Tradução nossa: O desmatamento faz com que a precipitação simulada diminua em 0,73 mm por dia na região.

O avanço das pesquisas sobre a estabilidade ecológica da Amazônia tem ampliado a compreensão acerca dos limites críticos de funcionamento do bioma. Nesse sentido, Nobre et al. (2016, p. 10759) afirmam que “the Amazon may have two ‘tipping points,’ namely, temperature increase of 4 °C or deforestation exceeding 40% of the forest area”⁸¹, indicando a existência de limiares ecológicos a partir dos quais o sistema pode sofrer mudanças abruptas. Essa perspectiva demonstra que a estabilidade amazônica depende da manutenção de condições ecológicas mínimas, sendo caracterizada por mecanismos de retroalimentação capazes de intensificar os efeitos da degradação ambiental.

De forma complementar, Lovejoy e Nobre (2018, p. 1) afirmam que “negative synergies between deforestation, climate change, and widespread use of fire indicate a tipping point for the Amazon system to flip to non-forest ecosystems”⁸², indicando que a continuidade do desmatamento pode conduzir a uma transição para estados ambientais mais secos e degradados. O argumento reforça que a degradação amazônica não representa apenas perda gradual de funcionalidade ecológica, mas a possibilidade de ruptura sistêmica com impactos sobre o clima, os regimes hidrológicos e a biodiversidade.

Um dos mecanismos associados a esse processo consiste na alteração do balanço energético da superfície terrestre. Salazar, Nobre e Oyama (2007, p. 1) afirmam que “Evapotranspiration is reduced and surface temperature is increased when rainforests are replaced by pasturelands”⁸³, evidenciando que o desmatamento contribui simultaneamente para a redução da umidade e para o aumento da temperatura regional. Essa alteração intensifica processos de aquecimento regional e compromete a estabilidade climática associada à manutenção da floresta amazônica.

Esses impactos não se restringem à Amazônia, inserindo-se em um contexto mais amplo de mudanças climáticas globais. O IPCC (2021, p. 4) afirma que “It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land”⁸⁴, indicando que as alterações ambientais decorrentes das atividades humanas possuem efeitos sistêmicos sobre o clima planetário. Essa evidência reforça a relevância estratégica do bioma amazônico para a estabilidade climática global e para a manutenção dos processos hidrológicos em diferentes escalas.

⁸¹ Tradução nossa: A Amazônia pode possuir dois ‘pontos de não retorno’, a saber, aumento de temperatura de 4 °C ou desmatamento superior a 40% da área florestal.

⁸² Tradução nossa: Sinergias negativas entre desmatamento, mudanças climáticas e uso disseminado do fogo indicam um ponto de não retorno para que o sistema amazônico se transforme em ecossistemas não florestais.

⁸³ Tradução nossa: A evapotranspiração é reduzida e a temperatura da superfície aumenta quando florestas tropicais são substituídas por pastagens.

⁸⁴ Tradução nossa: É inequívoco que a influência humana aqueceu a atmosfera, o oceano e a terra.

No contexto brasileiro, a alteração do regime de chuvas pode comprometer setores estratégicos da economia, especialmente a agricultura e a geração de energia hidrelétrica. A irregularidade das precipitações afeta diretamente a produtividade agrícola e a disponibilidade de água para geração de energia, evidenciando a interdependência entre a floresta amazônica e o funcionamento do sistema econômico nacional.

No que se refere aos solos, sua fertilidade depende diretamente da cobertura vegetal e da dinâmica natural de nutrientes. Quesada et al. (2010, p. 1515) afirmam que “Essential elements for plant growth such as calcium, magnesium, potassium and phosphorus usually have their concentrations reduced”⁸⁵, evidenciando que os solos amazônicos apresentam limitações naturais de fertilidade e elevada vulnerabilidade à degradação após a remoção da cobertura vegetal. Esse processo resulta na perda de fertilidade, na intensificação de processos erosivos e na degradação física do solo. Como consequência, a remoção da vegetação compromete rapidamente sua capacidade produtiva. Essa dinâmica favorece a expansão de novas áreas de desmatamento, perpetuando ciclos sucessivos de degradação ambiental. Seguem abaixo os principais impactos relacionados ao desmatamento no Quadro 12.

Quadro 12 – Principais impactos ambientais do desmatamento amazônico

Impacto	Descrição
Redução da evapotranspiração	Menor liberação de vapor d’água para a atmosfera
Alteração dos rios voadores	Redução do transporte de umidade para outras regiões
Aumento da temperatura	Mudança no balanço energético da superfície
Redução das chuvas	Diminuição da precipitação regional e nacional
Eventos extremos	Aumento de secas e irregularidade climática
Aumento das emissões de carbono	Intensificação das queimadas e liberação de gases de efeito estufa

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Marengo (2006), Costa e Foley (2000), Salazar, Nobre e Oyama (2007), Nobre et al. (2016), Lovejoy e Nobre (2018) e IPCC (2021).

O Quadro 12 evidencia que os impactos do desmatamento amazônico ultrapassam a simples remoção da cobertura vegetal, afetando processos ecológicos fundamentais para a estabilidade climática e hidrológica do bioma. A redução da evapotranspiração, a alteração dos fluxos de umidade, o aumento das temperaturas e a intensificação de eventos extremos demonstram que a degradação da floresta compromete mecanismos naturais de regulação ambiental em diferentes escalas. A ampliação das emissões de carbono associadas às queimadas reforça a contribuição do desmatamento para o agravamento das mudanças climáticas, evidenciando a interdependência entre conservação florestal, equilíbrio climático e estabilidade socioeconômica.

⁸⁵ Tradução nossa: Elementos essenciais para o crescimento das plantas, como cálcio, magnésio, potássio e fósforo, geralmente apresentam redução em suas concentrações.

Nesse contexto, observa-se uma alteração no papel da floresta amazônica no ciclo do carbono. Aragão et al. (2018, p. 8) afirmam que “C emissions from the Brazilian Amazon are increasingly dominated by forest fires during extreme droughts”⁸⁶, indicando que determinadas regiões da Amazônia têm ampliado suas emissões de carbono em razão da intensificação das queimadas associadas às secas extremas. Essa evidência demonstra que o avanço do desmatamento, aliado às mudanças climáticas, compromete a capacidade da floresta de atuar como reguladora do balanço global de carbono.

Aragão et al. também afirmam que “fires occurring in different land uses and forests have a direct impact on climate change by increasing C and aerosol loads in the atmosphere”⁸⁷, evidenciando que não apenas o desmatamento total, mas também processos de degradação florestal e queimadas contribuem para o aumento das emissões de gases de efeito estufa. Essa constatação amplia a compreensão do problema ao demonstrar que impactos climáticos significativos podem ocorrer mesmo em áreas onde a floresta não foi integralmente removida.

No que se refere à interação entre clima e uso da terra, Nobre e Borma (2009, p. 28) afirmam que “The Amazon forest plays an important role in the global climate system”⁸⁸, evidenciando que alterações na cobertura florestal amazônica possuem capacidade de influenciar processos climáticos em escala global. Essa constatação reforça a relevância estratégica da Amazônia para a manutenção do equilíbrio climático planetário.

Nobre et al. (2016, p. 10759) afirmam que “A number of large-scale drivers of environmental change are operating simultaneously and interacting nonlinearly in the Amazon, namely, land-use change and climate changes due to global warming and to deforestation”⁸⁹, demonstrando que a estabilidade da floresta depende da interação entre múltiplos processos ecológicos e climáticos. Essa perspectiva sistêmica evidencia que a degradação amazônica compromete mecanismos ambientais essenciais relacionados à dinâmica da biosfera, à regulação climática e à manutenção do equilíbrio hidrológico em escala regional e global.

A relação entre desmatamento e mudanças no regime de precipitação também tem sido amplamente documentada. Costa e Pires (2010, p. 158) afirmam que “deforestation in Amazonia leads to reductions in regional evapotranspiration and rainfall.”⁹⁰, indicando que a

⁸⁶ Tradução nossa: As emissões de carbono da Amazônia brasileira estão sendo cada vez mais dominadas por incêndios florestais durante secas extremas.

⁸⁷ Tradução nossa: Incêndios ocorrendo em diferentes usos da terra e florestas possuem impacto direto sobre as mudanças climáticas ao aumentar as cargas de carbono e aerossóis na atmosfera.

⁸⁸ Tradução nossa: A floresta amazônica desempenha papel importante no sistema climático global.

⁸⁹ Tradução nossa: Diversos fatores de grande escala responsáveis pelas mudanças ambientais estão atuando simultaneamente e interagindo de forma não linear na Amazônia, especialmente as mudanças no uso da terra e as alterações climáticas decorrentes do aquecimento global e do desmatamento.

⁹⁰ Tradução nossa: O desmatamento na Amazônia leva à redução da evapotranspiração regional e das chuvas.

perda de cobertura florestal reduz a capacidade de formação de chuvas. Essa dinâmica afeta não apenas a região amazônica, mas também áreas dependentes da umidade transportada pela floresta.

A intensificação de eventos extremos constitui uma das principais consequências da degradação ambiental na Amazônia. Marengo et al. (2018, p. 3; p. 9) destacam a ocorrência de “Three ‘mega-droughts’ in 2005, 2010 and 2016.”⁹¹ e afirmam que “This may increase the risk of recurrence of intense droughts and fires and would jeopardize the biome in the long term.”⁹², evidenciando que a continuidade do desmatamento e das mudanças climáticas tende a ampliar a frequência de secas severas, incêndios florestais e instabilidades hidrológicas na região amazônica. Essa intensificação dos extremos climáticos compromete a previsibilidade dos sistemas naturais, amplia a vulnerabilidade de populações dependentes dos recursos hídricos e afeta diretamente atividades econômicas sensíveis à estabilidade climática, como a agricultura e a geração de energia hidrelétrica.

Além dos impactos ambientais, tais transformações possuem implicações econômicas significativas. Fearnside e Leal Filho (2025, p. 1237) afirmam que “Brazil’s agribusiness and its family agriculture would suffer heavy impacts”⁹³, evidenciando que a intensificação das secas e a irregularidade do regime de chuvas tendem a comprometer tanto a produção agrícola em larga escala quanto os sistemas de agricultura familiar dependentes da estabilidade climática. Essa relação demonstra que a degradação ambiental produz impactos econômicos e sociais amplos, afetando a produtividade agrícola, a segurança alimentar e a estabilidade de cadeias produtivas fortemente dependentes da disponibilidade hídrica e da previsibilidade climática.

A irregularidade das precipitações reduz safras, eleva custos de produção e compromete a segurança alimentar. De forma complementar, a diminuição da disponibilidade hídrica afeta a geração de energia hidrelétrica, uma das principais fontes da matriz energética brasileira. Esses fatores evidenciam que os impactos do desmatamento ultrapassam a dimensão ambiental, atingindo diretamente a estrutura econômica e social do país.

Dessa forma, a derrubada da floresta amazônica não representa apenas a perda de cobertura vegetal, mas a desestruturação de um sistema climático complexo, cuja estabilidade depende da interação entre vegetação, atmosfera e recursos hídricos. A continuidade desse

⁹¹ Tradução nossa: Três ‘megassecas’ em 2005, 2010 e 2016

⁹² Tradução nossa: Isso pode aumentar o risco de recorrência de secas intensas e incêndios e comprometer o bioma no longo prazo.”

⁹³ Tradução nossa: O agronegócio brasileiro e sua agricultura familiar sofreriam impactos severos.

processo pode conduzir a mudanças irreversíveis, com impactos ambientais, econômicos e sociais de grande magnitude, o que evidencia a necessidade de mecanismos institucionais e econômicos capazes de conter a degradação ambiental e estimular a conservação dos sistemas ecológicos amazônicos.

3.2 Internalização dos custos ambientais

A exploração predatória da floresta amazônica não se restringe aos impactos ambientais decorrentes do uso intensivo dos recursos naturais, estando igualmente associada à ausência de mecanismos capazes de internalizar os custos ambientais decorrentes da degradação ecológica. Nesse contexto, a não incorporação dos impactos ambientais às dinâmicas econômicas favorece a continuidade de práticas ambientalmente insustentáveis, especialmente em regiões submetidas a fortes pressões sobre os recursos naturais.

Essas limitações podem ser compreendidas a partir do conceito de externalidades. Nesse sentido, Seroa da Motta (1997, p. 3) afirma que “custos que afetam terceiros sem a devida compensação” constituem externalidades para o sistema econômico, evidenciando que determinadas atividades produzem impactos que não são integralmente incorporados pelos agentes responsáveis. Essa dinâmica demonstra que os prejuízos ambientais decorrentes da degradação florestal frequentemente são transferidos à coletividade, comprometendo a conservação dos recursos naturais e favorecendo padrões de exploração ambientalmente predatórios.

A partir dessa compreensão, Amazonas (2009, p. 184) afirma que “externalidades correspondem a efeitos involuntários das ações econômicas sobre terceiros”, evidenciando que determinadas atividades econômicas produzem impactos que ultrapassam os limites da relação entre produtor e consumidor. No caso da Amazônia, o desmatamento e a exploração predatória dos recursos naturais geram externalidades negativas associadas à perda de biodiversidade, à alteração dos ciclos hidrológicos e à emissão de gases de efeito estufa. Em sentido oposto, a manutenção da floresta em pé produz benefícios ambientais coletivos, como regulação climática, conservação da biodiversidade e manutenção do regime de chuvas, cujos efeitos extrapolam os limites territoriais da região amazônica.

Diante desse cenário, a Organização das Nações Unidas (1992, p. 17) estabelece, em seu Princípio 16 da Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, que “As autoridades nacionais devem procurar promover a internacionalização dos custos ambientais e o uso de instrumentos econômicos, tendo em vista a abordagem segundo a qual o poluidor deve,

em princípio, arcar com o custo da poluição [...]”. Esse princípio reforça a necessidade de adoção de instrumentos econômicos voltados à responsabilização dos agentes causadores de degradação ambiental, especialmente em situações nas quais os mecanismos tradicionais de controle não se mostram suficientes para prevenir danos ambientais. Nesse contexto, a internalização dos custos ambientais constitui mecanismo relevante para induzir padrões produtivos mais sustentáveis e reduzir incentivos econômicos associados à degradação ambiental.

Ao analisar os efeitos da ausência de mecanismos de correção econômica, Seroa da Motta (1997, p. 73) afirma que “Externalidades são, então, manifestações de preços ineficientes”, evidenciando que a não incorporação dos custos ambientais compromete a adequada alocação dos recursos naturais. Seroa da Motta (1997, p. 74) ainda destaca que “a eficiência econômica exige que se assinale o ‘preço correto’ aos recursos ambientais”, demonstrando que a ausência de internalização dos custos ambientais favorece padrões de exploração mais intensos do que aqueles socialmente desejáveis. Em razão disso, atividades economicamente lucrativas no curto prazo, como o desmatamento e a exploração predatória da floresta, tornam-se artificialmente mais vantajosas, uma vez que seus impactos ambientais não são integralmente assumidos pelos agentes responsáveis.

Essa lógica também se reflete na distribuição federativa das responsabilidades ambientais no Brasil. Embora os benefícios decorrentes da preservação da Amazônia sejam compartilhados em escala nacional e internacional, grande parte dos custos relacionados à conservação recai sobre os estados amazônicos, especialmente no que se refere às atividades de fiscalização, monitoramento ambiental e implementação de políticas públicas voltadas à proteção da floresta. Observa-se, assim, que os entes federativos responsáveis pela conservação ambiental nem sempre recebem compensações proporcionais aos benefícios coletivos produzidos pela manutenção da floresta em pé.

Essa assimetria pode ser compreendida a partir da sistematização apresentada no Quadro 13, que evidencia a desigualdade na distribuição de responsabilidades e benefícios ambientais entre as unidades federativas.

Quadro 13 – Assimetria na distribuição dos custos da conservação e dos benefícios ambientais da floresta amazônica

Elemento	Estados amazônicos	Unidades federativas não amazônicas	Implicação
Custos de conservação	Elevados (fiscalização, controle territorial)	Reduzidos	Desigualdade distributiva
Benefícios ambientais	Compartilhados nacionalmente	Amplamente usufruídos sem compensação proporcional	Socialização dos benefícios ambientais
Responsabilidade institucional	Alta	Baixa	Assimetria federativa
Incentivos econômicos	Insuficientes (pressões econômicas sobre a floresta)	Benefícios indiretos da conservação	Insuficiência de incentivos à conservação

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme demonstrado no Quadro 13, os estados amazônicos concentram parcela significativa dos custos relacionados à conservação ambiental, enquanto os benefícios decorrentes dos serviços ecossistêmicos produzidos pela floresta são compartilhados em escala nacional e global. Essa configuração evidencia uma assimetria distributiva na qual os custos da conservação permanecem territorialmente concentrados, enquanto os benefícios ambientais são amplamente socializados, reduzindo os incentivos econômicos à preservação da floresta amazônica.

Nesse contexto, assim como as externalidades negativas exigem mecanismos destinados à responsabilização dos agentes causadores de degradação ambiental, as externalidades positivas também demandam instrumentos voltados à compensação daqueles que promovem a preservação ambiental. Nesse sentido, Maganhini (2016, p. 19) afirma que “A indução de experiências positivas, que gratificam e recompensam as condutas de proteção, de conservação e de restauração dos serviços ambientais, transformou-se em uma nova tendência mundial”, evidenciando que o Pagamento por Serviços Ambientais constitui instrumento econômico voltado ao incentivo de práticas ambientalmente sustentáveis. Essa perspectiva demonstra que mecanismos compensatórios podem fortalecer estratégias de conservação da floresta e contribuir para a manutenção dos serviços ecossistêmicos compartilhados pela coletividade.

No caso da Amazônia, essa assimetria produz uma lógica econômica desfavorável à conservação da floresta em pé. Enquanto atividades como expansão agropecuária, exploração madeireira e mineração oferecem retornos econômicos imediatos, os benefícios ambientais decorrentes da preservação florestal permanecem amplamente distribuídos entre diferentes regiões e setores econômicos, sem compensação proporcional aos agentes responsáveis pela conservação. Dessa forma, a ausência de mecanismos capazes de internalizar os custos da manutenção da floresta favorece a continuidade das pressões econômicas sobre o bioma,

ampliando o risco de perda dos serviços ecossistêmicos responsáveis pela regulação climática, manutenção do ciclo hidrológico e conservação da biodiversidade.

Dessa forma, a efetividade desses mecanismos depende diretamente da capacidade institucional do Estado de formular, coordenar e executar políticas públicas ambientais adequadas, aspecto que evidencia a importância da análise das limitações institucionais da atuação estatal na proteção ambiental.

3.3 Limitações institucionais do Estado na proteção ambiental

A efetividade dos instrumentos voltados à proteção ambiental depende diretamente da capacidade institucional do Estado de formular, coordenar e executar políticas públicas ambientais adequadas. No contexto amazônico, a atuação estatal enfrenta fragilidades estruturais, técnicas, financeiras e operacionais que comprometem a implementação das normas ambientais e dificultam o controle das atividades responsáveis pela degradação da floresta.

A proteção ambiental na Amazônia Legal depende diretamente da capacidade do Estado de monitorar o território, fiscalizar atividades ilegais e garantir a aplicação da legislação ambiental. Nesse contexto, Rajão et al. (2022, p. 2) afirmam que o então ministro do Meio Ambiente “has extinguished the Ministry’s climate change secretariat and substantially reduced law enforcement activities”⁹⁴, evidenciando a redução das ações fiscalizatórias e o enfraquecimento da capacidade institucional do Estado. Em sentido semelhante, Lopes et al. (2021, p. 2) destacam que “O desmatamento apresentou tendência de aumento durante esse período, com expressiva aceleração também desde 2019. Enquanto o desmatamento aumentava, as ações de controle do Poder Público diminuía.” Esse cenário demonstra que as fragilidades estruturais do Estado reduzem a capacidade de fiscalização ambiental, favorecendo a expansão das atividades ilegais e ampliando a vulnerabilidade da floresta amazônica frente ao avanço do desmatamento.

As limitações técnicas da fiscalização ambiental também representam um importante desafio para a proteção da Amazônia. Apesar dos avanços no monitoramento por satélite, ainda persistem dificuldades relacionadas à capacidade de detecção rápida e autuação das infrações ambientais. Schmitt (2015, p. 168) destaca que “apenas 24,0% dos alertas de desmatamento são autuados”, evidenciando a baixa capacidade de resposta da fiscalização frente às infrações detectadas. Schmitt (2015, p. 168) observa ainda que “As limitações nesse caso estão

⁹⁴ Tradução nossa: extinguiu a secretaria de mudanças climáticas do Ministério e reduziu substancialmente as atividades de fiscalização ambiental.

relacionadas possivelmente à reduzida capacidade instalada do Ibama, especialmente da força de trabalho para atender todas as demandas”, demonstrando que deficiências operacionais e insuficiência de pessoal comprometem a efetividade das ações de controle ambiental e favorecem a continuidade do desmatamento ilegal. Sob essa perspectiva, Sampaio et al. (2024, p. 125) afirmam que “é necessária uma maior fiscalização por parte do poder público”, além da “melhoria do sistema de detecção das áreas desmatadas em tempo hábil”, indicando que restrições relacionadas ao monitoramento e à capacidade operacional do Estado reduzem a efetividade das ações de controle ambiental na floresta amazônica.

As restrições orçamentárias dos órgãos ambientais também comprometem a efetividade das ações de fiscalização e monitoramento. Mendes (2021, p. 114) destaca que a arrecadação das multas ambientais “representa apenas 0,5% do valor inicialmente apontado como devido e que há baixa incidência de pagamento destas multas”, evidenciando a fragilidade da política sancionadora aplicada pelo IBAMA. Essa baixa arrecadação reduz o efeito dissuasório das penalidades ambientais, dificulta a responsabilização dos infratores e compromete a capacidade do Estado de combater o desmatamento de forma mais eficaz. Adicionalmente, o Fundo Amazônia (2023, p. 2) destaca a necessidade de “apoio financeiro a projetos dos estados para o fortalecimento e ampliação das ações de fiscalização, investigação e combate a crimes e infrações ambientais”, demonstrando a importância do financiamento contínuo das estruturas responsáveis pela fiscalização e controle ambiental na Amazônia. Nesse contexto, a insuficiência de recursos financeiros limita investimentos em infraestrutura, tecnologia, logística e ampliação do quadro técnico especializado, dificultando a implementação contínua das políticas de controle ambiental.

Além das limitações financeiras, as dificuldades operacionais também representam um obstáculo significativo para a proteção ambiental na Amazônia. Lopes et al. (2021, p. 5) afirmam que “Enquanto as sanções ambientais caíam a seus menores níveis em mais de uma década, a velocidade da perda anual de vegetação voltou a ultrapassar os 10.000 km² anuais desde 2019.”, evidenciando a redução da capacidade operacional das ações de fiscalização ambiental. Essa situação demonstra que o enfraquecimento das ações de controle ambiental compromete a capacidade de resposta do Estado frente ao avanço do desmatamento na região amazônica. No âmbito institucional, Vieira et al. (2026, p. 15) destacam que “Persistem, contudo, desafios relevantes, como restrições logísticas, assimetrias estruturais entre instituições e fragilidades na padronização de protocolos interinstitucionais”, evidenciando que limitações operacionais e dificuldades de integração institucional comprometem a efetividade das ações de fiscalização ambiental. Assim, a complexidade logística da Amazônia Legal,

associada à limitação de equipes e infraestrutura, reduz a capacidade de resposta rápida às infrações ambientais.

Outro aspecto relevante refere-se ao enfraquecimento institucional das políticas ambientais nos últimos anos. Rajão et al. (2020, p. 248) afirmam que “[...] a share of the sector fails to comply with the country’s own environmental laws and supports the government’s undoing of past environmental achievements.”⁹⁵, evidenciando o enfraquecimento das estruturas de proteção ambiental e das políticas de controle do desmatamento. Essa fragilidade institucional compromete a continuidade das ações públicas voltadas à conservação da floresta amazônica. Paralelamente, Artaxo (2019, p. 323) destaca que “The deep cuts to science have weakened the inclusion of science in public policies and services that preserve the Amazon”⁹⁶, evidenciando que o enfraquecimento institucional compromete a capacidade do Estado de desenvolver e manter estratégias eficazes de proteção ambiental, ameaçando os avanços obtidos no combate ao desmatamento. Dessa forma, observa-se que as limitações institucionais do Estado não estão relacionadas apenas à existência de normas ambientais, mas principalmente à capacidade efetiva de monitorar, fiscalizar e aplicar sanções ambientais de maneira contínua e eficiente.

Outro aspecto relevante refere-se à dificuldade de articulação entre os diferentes níveis de governo, que constitui um obstáculo adicional à proteção da floresta amazônica. A existência de competências compartilhadas entre União, estados e municípios exige coordenação institucional, que nem sempre se concretiza de forma eficiente. A fragmentação administrativa e a baixa integração entre os entes federativos dificultam a construção de estratégias coordenadas de governança ambiental, favorecendo lacunas de atuação, sobreposição de competências e descontinuidade das ações de fiscalização e controle ambiental na Amazônia. As principais limitações institucionais podem ser sistematizadas conforme apresentado no Quadro 14.

⁹⁵ Tradução nossa: [...] parte do setor deixa de cumprir a própria legislação ambiental do país e apoia o desmonte, pelo governo, de conquistas ambientais anteriores.

⁹⁶ Tradução nossa: Os cortes profundos na ciência enfraqueceram a inclusão da ciência nas políticas públicas e nos serviços que preservam a Amazônia.

Quadro 14 – Principais limitações institucionais na proteção da floresta amazônica

Limitação institucional	Manifestação observada	Impacto sobre a proteção ambiental
Fragilidade fiscalizatória	Redução das ações de fiscalização e controle ambiental	Ampliação do desmatamento ilegal
Limitações técnicas e operacionais	Insuficiência de equipes, infraestrutura e monitoramento	Baixa capacidade de resposta às infrações ambientais
Restrição orçamentária	Baixa arrecadação de multas e limitação de investimentos públicos	Redução da capacidade de fiscalização ambiental
Enfraquecimento institucional	Redução da capacidade administrativa e descontinuidade de políticas públicas	Comprometimento das estratégias de conservação
Dificuldades de coordenação institucional	Baixa integração entre órgãos e entes federativos	Sobreposição de competências e lacunas de atuação
Complexidade territorial amazônica	Dificuldades logísticas e monitoramento de áreas remotas	Controle ambiental limitado

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Rajão et al. (2020; 2022), Lopes et al. (2021), Schmitt (2015), Mendes (2021), Fundo Amazônia (2023), Sampaio et al. (2024), Vieira et al. (2026) e Artaxo (2019).

O Quadro 14 evidencia que as limitações institucionais da atuação estatal na Amazônia envolvem fragilidades relacionadas à fiscalização, coordenação administrativa, disponibilidade de recursos públicos e implementação das políticas ambientais. Esses fatores reduzem a efetividade das ações de controle ambiental e dificultam o enfrentamento das atividades responsáveis pela degradação da floresta.

Nesse contexto, as fragilidades institucionais da atuação estatal reduzem a capacidade de implementação contínua das políticas ambientais e dificultam o enfrentamento coordenado das atividades responsáveis pela degradação florestal. A insuficiência de recursos técnicos, operacionais e administrativos compromete a efetividade do monitoramento, da fiscalização e da aplicação das normas ambientais, evidenciando que a proteção da floresta amazônica depende não apenas da existência de instrumentos jurídicos, mas da capacidade institucional do Estado de executá-los de forma permanente, integrada e eficiente.

3.4 Perda da biodiversidade

A perda de biodiversidade configura uma das dimensões mais críticas da degradação ambiental associada à derrubada da floresta amazônica e à utilização predatória dos recursos naturais. Esse processo não se limita à redução do número de espécies, pois envolve a perda de conectividade ecológica, a desestruturação das interações biológicas e o comprometimento da integridade ecossistêmica da floresta amazônica.

Nesse contexto, Newbold et al. (2015, p. 45) afirmam que “Biodiversity faces growing pressures from human actions, including habitat conversion and degradation, habitat

fragmentation, climate change, harvesting and pollution”⁹⁷. Essa evidência demonstra que a perda de biodiversidade resulta da atuação simultânea de diferentes pressões antrópicas, que não apenas reduzem espécies, mas também alteram habitats, fragmentam ecossistemas e intensificam a vulnerabilidade ambiental. Na Amazônia, esses processos se manifestam especialmente por meio do desmatamento, da fragmentação florestal e da degradação progressiva dos habitats naturais.

A fragmentação florestal configura um dos principais mecanismos de degradação da biodiversidade amazônica. Haddad et al. (2015, p. 5) afirmam que “fragmentation consistently degraded ecosystems, reducing species persistence, species richness, nutrient retention, trophic dynamics”⁹⁸, indicando que os efeitos da fragmentação comprometem múltiplos processos ecológicos essenciais ao funcionamento dos ecossistemas. Essa condição promove o isolamento de populações, reduz sua viabilidade ecológica e compromete progressivamente a integridade ecológica da floresta amazônica.

Além da fragmentação florestal, a degradação ambiental compromete diretamente processos ecológicos essenciais ao funcionamento da floresta amazônica. Nesse sentido, Barlow et al. (2016, p. 4) afirmam que “Both types of disturbance contributed to marked declines in species of high conservation and functional importance”⁹⁹. No estudo, esses dois tipos de perturbação referem-se tanto às alterações da paisagem, associadas ao desmatamento, ao isolamento e aos efeitos de borda, quanto às perturbações internas da floresta, como queimadas e exploração madeireira seletiva. Assim, a citação evidencia que diferentes formas de perturbação antrópica afetam simultaneamente a biodiversidade e a funcionalidade ecológica dos ecossistemas tropicais. Essas alterações comprometem processos como dispersão de sementes, polinização, ciclagem de nutrientes e regulação ecológica, reduzindo progressivamente a capacidade da floresta amazônica de manter sua integridade ecossistêmica e seus serviços ambientais.

A perda de biodiversidade também compromete as interações ecológicas responsáveis pela manutenção da dinâmica natural da floresta tropical. Nesse sentido, Peres et al. (2010, p. 2316) afirmam que “[...] interactions between spatially correlated patterns of habitat loss, habitat degradation and non-structural forest disturbance can accelerate or aggravate the rate of

⁹⁷ Tradução nossa: A biodiversidade enfrenta pressões crescentes decorrentes das ações humanas, incluindo conversão e degradação de habitats, fragmentação de habitats, mudanças climáticas, exploração de recursos e poluição.

⁹⁸ Tradução nossa: A fragmentação degradou consistentemente os ecossistemas, reduzindo a persistência das espécies, a riqueza de espécies, a retenção de nutrientes e a dinâmica trófica.

⁹⁹ Tradução nossa: Ambos os tipos de perturbação contribuíram para declínios acentuados em espécies de elevada importância para a conservação e funcionalidade ecológica.

population declines and local extinctions of forest interior species”¹⁰⁰. Essa evidência demonstra que diferentes formas de perturbação ambiental não atuam de modo isolado, mas de maneira interdependente, intensificando o declínio populacional e ampliando o risco de extinções locais em ecossistemas tropicais. Na Amazônia, essa dinâmica compromete processos ecológicos fundamentais, especialmente aqueles relacionados à dispersão de sementes e à regeneração florestal.

Além da redução da fauna, a degradação da biodiversidade amazônica produz alterações progressivas na estrutura funcional dos ecossistemas. Nesse sentido, Dirzo et al. (2014, p. 403) afirmam que “Because animal loss represents a major change in biodiversity, it is likely to have important effects on ecosystem functioning”¹⁰¹. A citação desloca a análise da simples perda de animais para seus efeitos sobre o funcionamento dos ecossistemas, demonstrando que a redução da fauna compromete processos ecológicos essenciais ao equilíbrio ambiental. No contexto amazônico, a redução de populações animais afeta cadeias tróficas, reduz a diversidade funcional e enfraquece os mecanismos naturais de recuperação ecológica da floresta.

Esses processos demonstram que a perda de biodiversidade na Amazônia ultrapassa a dimensão da extinção de espécies isoladas, afetando diretamente a capacidade de manutenção das interações ecológicas que sustentam o funcionamento da floresta. A simplificação progressiva dos ecossistemas amplia a vulnerabilidade ambiental e favorece a intensificação de processos de degradação ambiental associados às mudanças climáticas, queimadas e fragmentação florestal.

Os principais impactos associados à perda de biodiversidade na Amazônia podem ser sistematizados conforme apresentado no Quadro 15.

¹⁰⁰ Tradução nossa: [...] interações entre padrões espacialmente correlacionados de perda de habitat, degradação de habitat e perturbações florestais não estruturais podem acelerar ou agravar a taxa de declínio populacional e de extinções locais de espécies típicas do interior da floresta.

¹⁰¹ Tradução nossa: Como a perda de animais representa uma grande mudança na biodiversidade, é provável que ela produza efeitos importantes sobre o funcionamento dos ecossistemas.

Quadro 15 – Principais impactos da perda de biodiversidade na Amazônia

Impacto	Mecanismo ecológico	Efeito sistêmico	Consequência socioambiental
Extinção de espécies	Redução de populações e perda genética	Perda irreversível de funções ecológicas	Comprometimento da integridade ecológica
Fragmentação de habitats	Isolamento de populações	Redução da resiliência ecológica	Ampliação da vulnerabilidade ambiental
Erosão genética	Redução da variabilidade	Menor capacidade adaptativa	Maior sensibilidade às mudanças climáticas
Desequilíbrio ecológico	Alteração de cadeias tróficas	Instabilidade dos ecossistemas	Impactos sobre atividades humanas dependentes dos serviços ecossistêmicos
Perda de serviços ecossistêmicos	Redução de funções naturais	Comprometimento da funcionalidade ecológica	Redução da capacidade de regulação ambiental

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Dirzo et al. (2014), Haddad et al. (2015), Newbold et al. (2015), Cardinale et al. (2012), Barlow et al. (2016), Gardner et al. (2009) e Peres et al. (2010).

A sistematização apresentada no Quadro 15 evidencia que a perda de biodiversidade na Amazônia não se restringe à extinção de espécies isoladas, mas envolve processos ecológicos interdependentes que comprometem a manutenção dos processos naturais responsáveis pelo funcionamento dos ecossistemas amazônicos. Os impactos identificados revelam uma dinâmica cumulativa, na qual a fragmentação de habitats, a erosão genética e o desequilíbrio das cadeias tróficas reduzem progressivamente a resiliência ambiental e comprometem a capacidade de manutenção dos serviços ecossistêmicos associados à floresta amazônica.

Os efeitos dessa degradação produzem impactos que ultrapassam a dimensão estritamente ecológica, afetando atividades humanas dependentes da regulação climática, da disponibilidade hídrica e do equilíbrio ecológico proporcionado pela floresta amazônica. A redução da funcionalidade ecológica da floresta compromete processos associados à manutenção das condições ambientais necessárias à estabilidade dos sistemas naturais, ampliando progressivamente a vulnerabilidade socioambiental diante do avanço da degradação ambiental.

Essa compreensão é corroborada por Cardinale et al. (2012, p. 60), que afirmam que “biodiversity loss reduces the efficiency by which ecological communities capture biologically essential resources”¹⁰², indicando que a redução da diversidade biológica afeta diretamente processos ecológicos essenciais à manutenção dos ecossistemas. No contexto amazônico, essa dinâmica compromete a prestação de serviços ecossistêmicos associados à regulação climática, à polinização e à manutenção da qualidade hídrica.

¹⁰² Tradução nossa: a perda de biodiversidade reduz a eficiência pela qual as comunidades ecológicas capturam recursos biologicamente essenciais..

A irreversibilidade desses processos constitui elemento central para a compreensão da gravidade da degradação ambiental na Amazônia. A perda contínua de biodiversidade afeta não apenas espécies isoladas, mas também interações ecológicas fundamentais à manutenção da floresta. A simplificação progressiva dos ecossistemas reduz a capacidade de recuperação ambiental diante de perturbações antrópicas e climáticas, comprometendo processos ecológicos essenciais à estabilidade climática, hidrológica e ecológica da Amazônia.

4 OS SERVIÇOS AMBIENTAIS PRESTADOS PELA FLORESTA AMAZÔNICA

A compreensão da relevância da floresta amazônica ultrapassa a análise de sua composição física e biológica, exigindo a identificação dos serviços por ela prestados. Nesse contexto, conforme disposto no art. 2º da Lei nº 14.119/2021, consideram-se “serviços ecossistêmicos: benefícios relevantes para a sociedade gerados pelos ecossistemas” e “serviços ambientais: atividades individuais ou coletivas que favorecem a manutenção, a recuperação ou a melhoria dos serviços ecossistêmicos”. Embora a legislação estabeleça distinção entre os conceitos, reconhecendo que os serviços ecossistêmicos decorrem dos processos naturais dos ecossistemas, enquanto os serviços ambientais podem envolver ações humanas voltadas à sua conservação e manutenção, os termos são empregados de forma equivalente ao longo da tese, em razão da estreita relação existente entre eles.

Os serviços ecossistêmicos correspondem aos benefícios diretos e indiretos que os seres humanos obtêm dos ecossistemas, sendo fundamentais para a manutenção da vida, do bem-estar e das atividades econômicas. Nesse sentido, o Millennium Ecosystem Assessment (2005, p. V) define que:

Ecosystem services are the benefits people obtain from ecosystems. These include provisioning services such as food, water, timber, and fiber; regulating services that affect climate, floods, disease, wastes, and water quality; cultural services that provide recreational, aesthetic, and spiritual benefits; and supporting services such as soil formation, photosynthesis, and nutrient cycling¹⁰³.

A partir dessa definição, observa-se que os serviços ecossistêmicos expressam o caráter multifuncional dos ecossistemas, abrangendo tanto a provisão de recursos materiais quanto a regulação de processos ambientais e a sustentação das condições necessárias à vida. Essa perspectiva evidencia que os ecossistemas exercem funções essenciais à estabilidade ecológica, climática e hidrológica, tornando-se indispensáveis à manutenção das condições ambientais que sustentam as atividades humanas e a própria dinâmica dos sistemas naturais.

Com base nessa classificação, os serviços ecossistêmicos podem ser organizados em quatro categorias principais, conforme apresentado no Quadro 16:

¹⁰³ Tradução nossa: Serviços ecossistêmicos são os benefícios que os seres humanos obtêm dos ecossistemas. Estes incluem serviços de provisão, como alimentos, água, madeira e fibras; serviços de regulação, que afetam o clima, enchentes, doenças, resíduos e a qualidade da água; serviços culturais, que proporcionam benefícios recreativos, estéticos e espirituais; e serviços de suporte, como a formação do solo, a fotossíntese e a ciclagem de nutrientes.

Quadro 16 – Classificação dos Serviços Ecossistêmicos

Categoria de Serviço	Definição	Exemplos
Serviços de provisão	Produtos diretamente obtidos dos ecossistemas	Água, alimentos, madeira, fibras, plantas medicinais, recursos genéticos
Serviços de regulação	Processos naturais que mantêm o equilíbrio ambiental	Regulação do clima, controle de enchentes, purificação da água, polinização, controle de pragas, armazenamento de carbono
Serviços culturais	Benefícios não materiais proporcionados pela natureza	Lazer, turismo, espiritualidade, educação ambiental, identidade cultural, valor estético
Serviços de suporte	Processos ecológicos fundamentais à manutenção dos demais serviços ecossistêmicos	Formação do solo, ciclagem de nutrientes, produção primária, fotossíntese

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Millennium Ecosystem Assessment (2005, p. 49).

O Quadro 16 evidencia que os serviços ecossistêmicos não operam de forma isolada, mas mantêm relações de dependência ecológica entre si. Enquanto os serviços de provisão se relacionam à oferta de recursos materiais, os serviços de regulação destacam-se na manutenção do equilíbrio ambiental, especialmente na regulação climática e no armazenamento de carbono. Os serviços culturais incorporam dimensões sociais e simbólicas, ao passo que os serviços de suporte constituem a base ecológica necessária à manutenção dos demais serviços. Dessa forma, alterações em uma dessas categorias tendem a repercutir sobre o equilíbrio funcional dos ecossistemas como um todo.

No contexto brasileiro, Philip Fearnside (2010, p. 27) destaca que “A floresta amazônica brasileira fornece serviços ambientais à região amazônica, ao Brasil e ao mundo como um todo”, evidenciando seu papel fundamental na provisão de serviços ecossistêmicos essenciais, cujos impactos se estendem do âmbito regional ao global. Essa condição demonstra que a importância da floresta amazônica ultrapassa seus limites territoriais, influenciando processos associados à estabilidade climática, à disponibilidade hídrica e à manutenção do equilíbrio ambiental em diferentes regiões do país. Nesse sentido, apresentam-se, a seguir, os principais serviços ambientais prestados pela Floresta Amazônica, com destaque para seus impactos em diferentes regiões do Brasil.

4.1 Regulação climática e armazenamento de carbono

A Floresta Amazônica exerce papel fundamental na oferta de serviços ecossistêmicos de regulação, especialmente no que se refere ao armazenamento de carbono e à estabilidade climática. Esses serviços estão diretamente relacionados à capacidade da floresta de capturar e armazenar carbono atmosférico, influenciando a dinâmica climática em diferentes escalas.

Nesse sentido, Artaxo et al. (2022, p. 1) destacam que “Tropical forests are large pools of global carbon”¹⁰⁴, evidenciando sua importância como um dos principais reservatórios naturais desse elemento. Essa condição é reforçada por Gatti et al. (2021, p. 388), ao afirmarem que “The Amazon forest contains about 123 ± 23 petagrams carbon (Pg C) of above and belowground biomass, which can be released rapidly and may thus result in a sizeable positive feedback on global climate”¹⁰⁵, demonstrando não apenas a elevada capacidade de armazenamento de carbono da floresta amazônica, mas também a vulnerabilidade desse estoque, cuja estabilidade depende diretamente da integridade da floresta.

Além de atuar como um importante sumidouro de carbono, a floresta amazônica desempenha função ativa na regulação do sistema climático por meio de sua interação com a atmosfera. Esse processo ocorre, principalmente, através da fotossíntese, que contribui para a redução da concentração de gases de efeito estufa. Nesse contexto, Carlos Nobre (2014, p. 9) explica que:

O gás carbônico (CO₂) funciona como alimento para a planta, matéria-prima transformada pelo instrumental bioquímico com o uso de luz e água, em madeira, folhas, frutos, raízes. De forma encadeada, quando as plantas consomem CO₂, a concentração desse gás na atmosfera diminui. Com isso, num primeiro momento o planeta se esfria, o que faz as plantas crescerem menos, consumindo menos CO₂. No momento seguinte, a acumulação de CO₂ leva ao aquecimento do planeta, e assim sucessivamente, num ciclo oscilante de regulação.

Essa dinâmica evidencia que a vegetação amazônica participa ativamente dos mecanismos de regulação climática, atuando na absorção de dióxido de carbono e influenciando os processos de troca entre biosfera e atmosfera. A citação demonstra que a floresta não exerce função passiva no sistema climático, mas integra um mecanismo contínuo de retroalimentação ecológica capaz de influenciar o equilíbrio térmico do planeta.

A importância das florestas no contexto climático também é reconhecida em relatórios internacionais. Nesse sentido, o IPCC (2023, p. 3) destaca que “This report recognizes the interdependence of climate, ecosystems and biodiversity, and human societies”¹⁰⁶, afirmando que os sistemas naturais estão intrinsecamente ligados à dinâmica climática. Essa perspectiva reforça que alterações nos ecossistemas florestais produzem efeitos que ultrapassam a dimensão ambiental local, afetando processos climáticos, biodiversidade e atividades humanas de forma interdependente.

¹⁰⁴ Tradução nossa: As florestas tropicais são grandes reservatórios de carbono global.

¹⁰⁵ Tradução nossa: A floresta Amazônica contém cerca de 123 ± 23 petagramas de carbono (Pg C) de biomassa acima e abaixo do solo, que podem ser liberados rapidamente e, portanto, podem resultar em um feedback positivo considerável no clima global.

¹⁰⁶ Tradução nossa: Este relatório reconhece a interdependência do clima, dos ecossistemas e da biodiversidade, e das sociedades humanas.

No contexto brasileiro, os impactos dos serviços ecossistêmicos de regulação tornam-se ainda mais evidentes diante da vulnerabilidade da floresta amazônica às pressões antrópicas e climáticas. Nesse sentido, Aragão et al. (2018, p. 2) destacam que “while emissions due to deforestation have fallen, it has been shown that during drought years, fire incidence and associated C emissions in human-modified regions have increased”¹⁰⁷, evidenciando que, mesmo com a redução do desmatamento, eventos de seca intensificam a ocorrência de incêndios e as emissões. Esse cenário demonstra que a degradação da floresta pode ocorrer mesmo sem supressão florestal direta, especialmente em contextos de seca e aumento da vulnerabilidade climática. Dessa forma, a floresta pode ter sua função reguladora comprometida, contribuindo para o aumento das emissões de gases de efeito estufa e seus efeitos sobre o clima.

A amplitude desses efeitos pode ser observada na conectividade climática entre a Amazônia e outras regiões. Segundo Giammarese et al. (2024, p. 1), [...] our study shows that the connectivity between the Amazon rainforest and the global climate system has been experiencing reconfiguration.”¹⁰⁸. Essa conectividade demonstra que alterações na floresta amazônica possuem potencial de repercussão extrarregional, afetando padrões atmosféricos e climáticos para além dos limites do bioma.

A derrubada da floresta implica na liberação de grandes quantidades de carbono, com efeitos diretos sobre o clima em todo o território nacional. Nesse sentido, Fearnside (2016, p. 1) observa que “Brazilian Amazonia contains a large stock of carbon that could be released to the atmosphere as greenhouse gases as a result of land use and land-use change”¹⁰⁹. A citação evidencia que a mudança no uso da terra constitui um dos principais fatores de comprometimento da capacidade de armazenamento de carbono da floresta amazônica. Dessa forma, a mudança no uso da terra não apenas elimina a capacidade de retenção de carbono, mas também contribui diretamente para o aumento da concentração de gases de efeito estufa, intensificando os processos de aquecimento global.

Os principais processos associados à regulação climática e ao armazenamento de carbono na Amazônia podem ser sintetizados no Quadro 17:

¹⁰⁷ Tradução nossa: Embora as emissões decorrentes do desmatamento tenham diminuído, foi demonstrado que, durante anos de seca, a incidência de incêndios e as emissões associadas de carbono em regiões modificadas pelo homem aumentaram.

¹⁰⁸ Tradução nossa: [...] nosso estudo demonstra que a conectividade entre a Floresta Amazônica e o sistema climático global tem passado por um processo de reconfiguração.

¹⁰⁹ Tradução nossa: A Amazônia brasileira contém um grande estoque de carbono que poderia ser liberado na atmosfera como gases de efeito estufa como resultado do uso da terra e da mudança no uso da terra.

Quadro 17 – Processos de regulação climática e armazenamento de carbono na Amazônia

Processo ecológico	Mecanismo	Evidência científica	Efeito climático
Armazenamento de carbono	Acúmulo de carbono na biomassa	Artaxo et al. (2022); Gatti et al. (2021)	Redução de CO ₂ atmosférico
Fotossíntese	Absorção de CO ₂ pela vegetação	Nobre (2014)	Regulação da temperatura global
Manutenção da Integridade florestal	Manutenção dos estoques de carbono	IPCC (2023)	Estabilidade do sistema climático
Secas e incêndios	Emissões associadas à degradação	Aragão et al. (2018)	Aumento de gases de efeito estufa
Desmatamento	Liberação de carbono armazenado	Fearnside (2016)	Intensificação do aquecimento global

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Artaxo et al. (2022), Gatti et al. (2021), Nobre (2014), IPCC (2023), Aragão et al. (2018) e Fearnside (2016).

O quadro 17 evidencia que a regulação climática exercida pela Amazônia depende da continuidade de processos biológicos articulados entre si, nos quais o carbono circula entre estoque e emissão conforme as condições ambientais e o uso da terra. Observa-se que a capacidade de atuação da floresta está diretamente condicionada à sua integridade, uma vez que alterações como desmatamento e degradação invertem a função do sistema, deslocando-o de um estado de equilíbrio para um cenário de intensificação das emissões. Nesse sentido, os processos compõem uma dinâmica ecológica integrada, na qual perturbações locais podem amplificar efeitos climáticos em escala mais ampla, comprometendo a estabilidade climática.

A captação e o armazenamento de carbono, associados à regulação do clima, configuram importantes serviços ecossistêmicos de regulação fornecidos pela Floresta Amazônica. Esses processos resultam da interação entre a vegetação e a atmosfera, contribuindo para a redução da concentração de gases de efeito estufa e para a estabilidade do clima em diferentes regiões do Brasil. A manutenção desse equilíbrio climático reduz a ocorrência de eventos extremos capazes de comprometer setores estratégicos do país, como a agricultura, o abastecimento hídrico e a geração de energia, evidenciando que os serviços ambientais prestados pela Amazônia produzem efeitos que ultrapassam os limites regionais do bioma.

4.2 Ciclo hidrológico dos "rios voadores" e manutenção da biodiversidade

A floresta amazônica exerce importantes serviços ecossistêmicos de regulação e suporte ecológico, especialmente relacionados à manutenção do ciclo hidrológico e à conservação da biodiversidade. A interação entre vegetação, atmosfera e recursos hídricos sustenta processos

responsáveis pela reciclagem de umidade, pela formação de chuvas e pela estabilidade ecológica do bioma. Paralelamente, a elevada diversidade biológica da Amazônia contribui para a manutenção das funções ecossistêmicas, da resiliência ambiental e da estabilidade dos processos naturais. Esses mecanismos demonstram que a conservação da floresta em pé possui relevância estratégica para o equilíbrio climático, hidrológico e ecológico em escala regional e continental.

a) Ciclo hidrológico dos “rios voadores”

A Floresta Amazônica exerce papel central na prestação de serviços ecossistêmicos de regulação associados ao ciclo hidrológico, atuando como um dos principais elementos estruturantes da dinâmica climática sul-americana. Esse serviço manifesta-se de forma particularmente expressiva por meio do fenômeno conhecido como “rios voadores”, caracterizado pelo transporte de grandes volumes de vapor d’água da superfície para a atmosfera e sua posterior redistribuição por meio da circulação atmosférica. A magnitude desse processo pode ser compreendida a partir da intensa atividade de evapotranspiração da vegetação, conforme descrito por Nobre (2014, p. 13):

Uma árvore grande pode bombear do solo e transpirar mais de mil litros de água num único dia. A Amazônia sustenta centenas de bilhões de árvores em suas florestas. Vinte bilhões de toneladas de água por dia são transpiradas por todas as árvores na bacia amazônica. Em seu conjunto, as árvores, essas benevolentes e silenciosas estruturas verdes vivas da natureza, similares a geisers, jorram para o ar um rio vertical de vapor mais importante que o Amazonas.

A citação evidencia a dimensão da transferência de umidade promovida pela floresta amazônica, demonstrando que a vegetação atua ativamente na formação de fluxos atmosféricos responsáveis pelo transporte de vapor d’água para diferentes regiões do continente sul-americano.

A evapotranspiração amazônica está diretamente integrada aos sistemas de circulação atmosférica de larga escala, que promovem o transporte de umidade para outras regiões do continente. Nesse contexto, Giammarese et al. (2024, p. 1) afirmam que “Amazon rain forest also modulates the local and global rainfall patterns through evapotranspiration.”¹¹⁰, indicando que a floresta não apenas participa do ciclo hidrológico, mas atua como um agente ativo na modulação dos regimes de precipitação. Essa influência demonstra que alterações na dinâmica

¹¹⁰ Tradução nossa: A floresta amazônica também modula os padrões de chuva locais e globais através da evapotranspiração.

amazônica possuem potencial de repercussão sobre padrões climáticos e hidrológicos em diferentes escalas espaciais.

O papel da Floresta Amazônica no ciclo hidrológico está diretamente associado à sua capacidade de influenciar a distribuição de chuvas em diferentes regiões do país. Nesse contexto, Philip Fearnside (2005, p. 1) destaca que “water recycled by the Amazon forest makes a substantial contribution to rainfall in the central and southern parts of the country”¹¹¹. Tal evidência indica que a umidade gerada na Amazônia não se restringe à região Norte, sendo transportada por fluxos atmosféricos para outras áreas do território nacional.

No mesmo sentido, Antonio Donato Nobre (2014, p. 12) ressalta que “a floresta mantém o ar úmido por mais de 3.000 km continente adentro”, evidenciando a extensão espacial desses processos. Em conjunto, essas contribuições demonstram que a dinâmica hidrológica amazônica exerce influência direta sobre a disponibilidade hídrica, a estabilidade climática e a geração de energia hidrelétrica em diferentes regiões do Brasil.

Os principais processos associados ao ciclo hidrológico amazônico e ao fenômeno dos “rios voadores” podem ser sintetizados no Quadro 18.

Quadro 18 – Síntese do ciclo hidrológico amazônico e dos “rios voadores”

Processo hidrológico	Mecanismo	Evidência científica	Impacto
Evapotranspiração	Liberação de vapor pelas árvores	Nobre (2014)	Formação de umidade atmosférica
Reciclagem de umidade	Reincorporação do vapor ao sistema	Fearnside (2005)	Manutenção das chuvas
Transporte atmosférico	Circulação de vapor (“rios voadores”)	Nobre (2014)	Distribuição de umidade no território
Modulação climática	Influência nos regimes de precipitação	Giammarese et al. (2023)	Regulação do ciclo hidrológico
Alcance espacial	Fluxo de umidade a longa distância	Nobre (2014)	Influência no Centro-Oeste e Sudeste

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Nobre (2014), Fearnside (2005) e Giammarese et al. (2023).

O Quadro 18 evidencia que o funcionamento do ciclo hidrológico amazônico depende da articulação entre processos de produção, reciclagem e transporte de umidade, responsáveis pela manutenção dos regimes de precipitação. Observa-se que a evapotranspiração atua como elemento central na geração de vapor atmosférico, enquanto a circulação atmosférica possibilita sua redistribuição em longas distâncias. Essa dinâmica demonstra que alterações na cobertura

¹¹¹ Tradução nossa: A água reciclada pela floresta amazônica contribui substancialmente para a chuva nas partes central e sul do país.

florestal possuem potencial de comprometer a disponibilidade hídrica e os regimes de chuva em regiões dependentes desses fluxos atmosféricos.

Assim, verifica-se que o ciclo hidrológico amazônico e os “rios voadores” constituem serviços ecossistêmicos essenciais para o Brasil. A produção, reciclagem e transporte de umidade influenciam diretamente o abastecimento hídrico, a produção agrícola e a geração de energia em diferentes regiões do país. Desse modo, a conservação da floresta amazônica contribui para a manutenção dos fluxos atmosféricos responsáveis pela estabilidade climática e hídrica em escala nacional.

b) Manutenção da biodiversidade

A floresta amazônica abriga uma das maiores concentrações de biodiversidade do planeta, sendo frequentemente reconhecida como um dos principais centros globais de diversidade biológica. Nesse sentido, Vilela et al. (2020, p. 1) destacam que “It hosts 10 to 15% of global terrestrial biodiversity”¹¹², evidenciando sua relevância ecológica em escala planetária. Essa elevada diversidade confere à região o papel de um vasto reservatório de recursos genéticos, fundamentais para o desenvolvimento científico e para aplicações em áreas como medicina, agricultura e biotecnologia, consolidando a Amazônia como um sistema estratégico para a manutenção da vida e para a inovação tecnológica em escala global.

A manutenção da biodiversidade está diretamente associada aos serviços ecossistêmicos de suporte, responsáveis pela sustentação dos processos ecológicos fundamentais que garantem a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas. Nesse sentido, o Millennium Ecosystem Assessment (2005, p. 40) afirma que “supporting services are those that are necessary for the production of all other ecosystem services”¹¹³, evidenciando que a biodiversidade não se configura apenas como um elemento ecológico isolado, mas como base necessária à manutenção dos demais serviços ecossistêmicos.

A biodiversidade desempenha papel fundamental na manutenção dos sistemas naturais e na sustentação da vida humana, estando diretamente relacionada às funções e aos serviços ecossistêmicos. Nesse sentido, o IPBES (2019, p. 10) destaca que:

¹¹² Tradução nossa: ele abriga de 10 a 15% da biodiversidade terrestre global.

¹¹³ Tradução nossa: serviços de apoio são aqueles que são necessários para a produção de todos os outros serviços ecossistêmicos.

Nature plays a critical role in providing food [...] sustains the quality of the air, fresh water and soils on which humanity depends, distributes fresh water, regulates the climate, provides pollination and pest control and reduces the impact of natural hazards.¹¹⁴

No contexto brasileiro, esses processos são particularmente relevantes na floresta amazônica, cuja biodiversidade sustenta serviços ambientais associados à regulação climática, à disponibilidade hídrica e à estabilidade ecológica.

A biodiversidade contribui para a resiliência dos ecossistemas, permitindo sua adaptação a perturbações e mudanças ambientais. Nesse sentido, o IPCC (2022, p. 826) destaca que “Biodiversity may improve resilience to climate change impacts as more-diverse systems could be more resilient [...]”.¹¹⁵, evidenciando que sistemas biologicamente mais diversos apresentam maior capacidade de resposta frente às mudanças climáticas.

Além de sua relevância ecológica, a biodiversidade amazônica apresenta significativo valor econômico, especialmente no fornecimento de recursos biológicos utilizados como matéria-prima em diversas cadeias produtivas. Os recursos naturais da floresta constituem insumos estratégicos para setores como as indústrias farmacêutica, cosmética e alimentícia, destacando-se pela presença de compostos bioativos com elevado potencial de aplicação tecnológica. Nesse contexto, o United Nations Environment Programme (UNEP, 2010, p. ix) destaca que “They are sources of food and essential nutrients, medicines and medicinal compounds, fuel, energy, livelihoods and cultural and spiritual enrichment.”¹¹⁶, evidenciando a importância da biodiversidade como base para o desenvolvimento de produtos de alto valor agregado.

A utilização de recursos biológicos em diferentes setores produtivos evidencia a relevância econômica da biodiversidade no contexto das cadeias produtivas. Nesse sentido, o UNEP (2010, p. 12) observa que “Medicinal and aromatic plants, the great majority of which are sourced from the wild, are used in traditional medicine and also in the pharmaceutical, cosmetic and food industries.”¹¹⁷ A citação demonstra que recursos biológicos de origem natural possuem ampla inserção econômica e industrial.

¹¹⁴ Tradução nossa: A natureza desempenha um papel crítico na provisão de alimentos [...] sustenta a qualidade do ar, da água doce e dos solos dos quais a humanidade depende, distribui água doce, regula o clima, fornece polinização e controle de pragas e reduz o impacto de perigos naturais.

¹¹⁵ Tradução nossa: A biodiversidade pode melhorar a resiliência aos impactos das mudanças climáticas, já que sistemas mais diversificados podem ser mais resilientes [...]

¹¹⁶ Tradução nossa: Eles são fontes de alimentos e nutrientes essenciais, medicamentos e compostos medicinais, combustível, energia, meios de subsistência e enriquecimento cultural e espiritual.

¹¹⁷ Tradução nossa: Plantas medicinais e aromáticas, a grande maioria das quais é obtida na natureza, são usadas na medicina tradicional e também nas indústrias farmacêutica, cosmética e alimentícia.

A matéria-prima oriunda da biodiversidade amazônica é extraída na região e destinada a outras partes do país para processamento industrial. Essa dinâmica reflete a concentração da indústria brasileira nas regiões Sudeste e Sul, que reúnem a maior parcela do valor da transformação industrial. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), setores como alimentos, produtos químicos — incluindo a indústria farmacêutica — e higiene pessoal, perfumaria e cosméticos possuem forte participação na estrutura industrial nacional. Nesse contexto, os insumos amazônicos são incorporados a essas cadeias produtivas, contribuindo para a produção industrial, a geração de empregos e a dinamização econômica em outras regiões do país.

No caso da Amazônia, esse processo implica não apenas em perdas ambientais, mas também na redução do potencial econômico associado aos recursos biológicos, limitando oportunidades futuras de inovação científica e tecnológica. Diante disso, verifica-se que a manutenção da biodiversidade amazônica constitui um serviço ecossistêmico de caráter multifuncional, com implicações ecológicas, econômicas e sociais, uma vez que a floresta não apenas sustenta processos naturais essenciais, mas também fornece recursos estratégicos para diferentes regiões do Brasil. Assim, a conservação da floresta amazônica em pé contribui para a continuidade desses serviços e para a manutenção de recursos biológicos estratégicos associados ao desenvolvimento científico, econômico e ambiental.

Os principais aspectos relacionados à manutenção da biodiversidade amazônica podem ser sintetizados no Quadro 19.

Quadro 19 – Síntese da função ecológica, climática e econômica da biodiversidade amazônica

Dimensão	Função	Evidência científica	Implicação
Ecológica	Alta diversidade de espécies	Vilela et al. (2020)	Reserva genética global
Funcional	Base dos serviços ecossistêmicos	Millennium Ecosystem Assessment (2005)	Sustentação dos demais serviços
Climática	Aumento da resiliência	IPCC (2022)	Adaptação às mudanças climáticas
Sistêmica	Suporte à vida humana	IPBES (2019)	Regulação ambiental e bem-estar
Econômica	Fornecimento de insumos	UNEP (2010)	Cadeias produtivas industriais
Territorial	Integração com economia nacional	IBGE (2022)	Dinamização regional

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Vilela et al. (2020), Millennium Ecosystem Assessment (2005), IPBES (2019), IPCC (2022), UNEP (2010) e IBGE (2022).

O Quadro 19 evidencia que a biodiversidade amazônica desempenha funções que extrapolam a dimensão ecológica, articulando-se simultaneamente com processos climáticos e dinâmicas econômicas. Observa-se que sua relevância está associada à capacidade de sustentar a funcionalidade dos ecossistemas, ao mesmo tempo em que contribui para a resiliência frente a perturbações e para a geração de valor econômico. Essa integração demonstra que a perda de biodiversidade produz impactos ambientais, econômicos e sociais interdependentes, afetando tanto a capacidade adaptativa dos sistemas naturais quanto o aproveitamento sustentável de recursos biológicos estratégicos.

4.3 Controle de chuvas, temperatura e conservação do solo e água

A floresta amazônica exerce funções ecológicas fundamentais para a manutenção da estabilidade ambiental, especialmente por meio de serviços ecossistêmicos de regulação associados ao controle climático, à conservação hídrica e à proteção dos solos. Esses serviços influenciam diretamente a dinâmica das chuvas, a regulação da temperatura, a manutenção da umidade e a estabilidade dos processos ecológicos, contribuindo para o equilíbrio ambiental em escala regional e continental. Ao favorecer a conservação dos recursos naturais e a estabilidade climática, tais funções sustentam indiretamente atividades econômicas, sistemas produtivos e condições ambientais indispensáveis à manutenção da vida e ao funcionamento das sociedades humanas.

Nesse contexto, destacam-se os efeitos da cobertura vegetal sobre o controle das chuvas e da temperatura, bem como sua contribuição para a conservação do solo e da água, processos diretamente relacionados à estabilidade ambiental e à manutenção das funções ecológicas desempenhadas pela Amazônia.

a) Controle de chuvas e temperatura

A Floresta Amazônica exerce influência determinante sobre os padrões climáticos em escala regional e continental, especialmente no que se refere à distribuição das chuvas e à regulação da temperatura, configurando-se como um serviço ecossistêmico de regulação climática. A cobertura vegetal atua diretamente na modulação de variáveis atmosféricas fundamentais. Diferentemente da dinâmica do ciclo hidrológico, o controle climático associado à vegetação manifesta-se por meio de seus efeitos sobre o balanço energético e sobre a estabilidade dos sistemas atmosféricos.

No que se refere ao regime de precipitação, a presença da vegetação amazônica contribui para a manutenção da regularidade e da intensidade das chuvas, influenciando padrões espaciais e temporais da circulação atmosférica. Nesse sentido, Spracklen, Arnold e Taylor (2012, p. 282) destacam que “air that has passed over extensive vegetation in the preceding few days produces at least twice as much rain as air that has passed over little vegetation”¹¹⁸, demonstrando que a floresta atua como importante fonte de umidade atmosférica e exerce influência direta sobre a formação de chuvas. Essa dinâmica evidencia que a manutenção da vegetação possui papel estratégico na estabilidade dos regimes pluviométricos e na continuidade dos fluxos hidrológicos regionais.

De forma complementar, Staal et al. (2020, p. 3) destacam que “as deforestation reduces forest area, less water can be recycled and dry seasons intensify regionally”¹¹⁹, indicando que a redução da cobertura florestal compromete os mecanismos responsáveis pela reciclagem de umidade atmosférica. Esse processo favorece o prolongamento dos períodos secos e amplia a vulnerabilidade climática do sistema amazônico, evidenciando que o avanço do desmatamento interfere diretamente na estabilidade hídrica e atmosférica da região.

A magnitude desses efeitos é evidenciada por Franco et al. (2025, p. 5), ao demonstrarem que “[...] the reduction in forest cover results in a 15.8mm decrease in precipitation per dry season in the Amazon region, constituting 74.5% of the overall effect.”¹²⁰, evidenciando impactos quantitativos relevantes sobre o regime de chuvas. Esse resultado reforça que a degradação da vegetação amazônica compromete não apenas o volume de precipitação, mas também a previsibilidade climática e a estabilidade ambiental em escala regional.

No que concerne à regulação térmica, a cobertura florestal exerce influência direta sobre a temperatura por meio de processos físicos associados à interação entre vegetação e atmosfera. Nesse sentido, Lawrence e Vandecar (2015, p. 32) afirmam que “surface temperature increases and evapotranspiration is reduced when tropical forest is converted to pasture”¹²¹. Esse resultado evidencia que a substituição da vegetação compromete os mecanismos biofísicos

¹¹⁸ Tradução nossa: O ar que passou por uma vegetação extensa nos últimos dias produz pelo menos o dobro de chuva do que o ar que passou por pouca vegetação.

¹¹⁹ Tradução nossa: à medida que o desmatamento reduz a área florestal, menos água pode ser reciclada e as estações secas se intensificam regionalmente.

¹²⁰ Tradução nossa: a redução da cobertura florestal resulta em uma diminuição de 15,8 mm na precipitação por estação seca, correspondendo a aproximadamente 74,5% do efeito total observado.

¹²¹ Tradução nossa: a temperatura da superfície aumenta e a evapotranspiração é reduzida quando a floresta tropical é convertida em pastagem.

responsáveis pela regulação do balanço de energia, contribuindo para o aumento da temperatura na superfície.

Esses efeitos são quantificados por Franco et al. (2025, p. 4), ao afirmarem que “[...] deforestation in the Amazon region resulted in a rise of 0.39 °C in the average daily maximum temperature over 35 years [...]”¹²². Esse resultado quantifica o impacto do desmatamento sobre a temperatura, evidenciando que a redução da cobertura florestal não modifica apenas o tipo de uso do solo, mas impacta diretamente as condições térmicas do ambiente, evidenciando o papel da floresta na modulação da temperatura.

Essas alterações não se restringem à área desmatada, uma vez que mudanças nos padrões climáticos podem se propagar para outras regiões. Nesse sentido, Spracklen, Arnold e Taylor (2012, p. 284) afirmam que “large-scale land-use change may alter precipitation hundreds to thousands of kilometres from the region of vegetation change”¹²³. Esse resultado evidencia que as modificações na cobertura florestal afetam os fluxos de umidade atmosférica em escala regional, permitindo que impactos sobre a precipitação se estendam para áreas distantes da região originalmente alterada. Dessa forma, o controle climático exercido pela Amazônia ultrapassa os limites do bioma, influenciando regimes de chuva em regiões dependentes dessa dinâmica, como o Centro-Oeste e o Sudeste do Brasil.

Dessa forma, compreende-se que o controle das chuvas e da temperatura constitui um serviço ecossistêmico de regulação essencial, diretamente associado à presença da cobertura florestal. A manutenção da Amazônia em pé assegura a estabilidade dos padrões climáticos, reduzindo a ocorrência de extremos e contribuindo para a previsibilidade ambiental. Nesse contexto, a conservação da floresta revela-se fundamental não apenas para o equilíbrio ecológico regional, mas também para a segurança climática e a sustentabilidade das atividades econômicas em escala nacional.

Os principais processos associados à influência da cobertura florestal sobre o regime de precipitação e a regulação térmica podem ser sintetizados no Quadro 20:

¹²² Tradução nossa: [...] o desmatamento na região amazônica resultou em um aumento de 0,39 °C na temperatura máxima média diária ao longo de 35 anos [...].

¹²³ Tradução nossa: mudanças em larga escala no uso da terra podem alterar a precipitação a centenas ou milhares de quilômetros da região onde ocorreu a mudança da vegetação.

Quadro 20 – Síntese dos efeitos da cobertura florestal sobre clima

Processo ecológico	Variável afetada	Evidência científica	Impacto observado
Evapotranspiração florestal	Precipitação	Spracklen et al. (2012)	Até 2x mais chuva em massas de ar sobre áreas florestadas
Reciclagem de umidade	Precipitação	Staal et al. (2020)	Redução da reciclagem e intensificação da estação seca
Redução da cobertura florestal	Precipitação	Franco et al. (2025)	Redução de 15,8 mm por estação seca
Conversão da floresta	Temperatura	Lawrence e Vandecar (2015)	Aumento da temperatura e redução da evapotranspiração
Desmatamento acumulado	Temperatura	Franco et al. (2025)	Aumento de 0,39 °C na temperatura máxima
Mudança no uso da terra	Precipitação	Spracklen et al. (2012)	Alterações pluviométricas em longa distância

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Conforme apresentado no Quadro 20, a presença da vegetação influencia diretamente tanto o regime de precipitação quanto a regulação térmica, evidenciando que a floresta atua simultaneamente sobre múltiplos processos climáticos. Observa-se que a manutenção da cobertura vegetal está associada ao aumento da precipitação e à estabilidade térmica, enquanto o desmatamento contribui para a redução das chuvas e o aumento das temperaturas. Esses resultados reforçam o papel da Amazônia como elemento estruturante da regulação climática em escala regional e continental.

b) Conservação do solo e qualidade da água

A relação entre a cobertura florestal e a estabilidade do solo e da água é um dos principais fatores pelos quais as florestas contribuem para o equilíbrio ambiental. No caso da Amazônia, essa função torna-se ainda mais relevante devido à elevada intensidade das chuvas e à fragilidade de determinados solos tropicais. Nesse contexto, a Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016, p. 2) destaca que “Forests minimize soil erosion on site, control water run-off, reduce sediment in water bodies and trap or filter water pollutants in the forest litter.”¹²⁴, evidenciando que a cobertura florestal atua como um mecanismo natural de proteção dos sistemas ambientais, ao regular processos físicos e reduzir a transferência de materiais e impurezas para os corpos d’água, contribuindo para a conservação integrada do solo e dos recursos hídricos.

¹²⁴ Tradução nossa: As florestas minimizam a erosão do solo no local, controlam o escoamento da água, reduzem o sedimento em corpos d’água e capturam ou filtram poluentes da água na serapilheira da floresta.

No que se refere à dinâmica hídrica, FAO (2016, p. 3) observa que “Forests play a crucial role in regulating water flows”¹²⁵. Essa constatação demonstra que a vegetação influencia diretamente o comportamento da água no ambiente, contribuindo para o controle do escoamento superficial, para a estabilidade dos fluxos hídricos e para a redução de processos erosivos.

A conservação do solo e da água na Amazônia está diretamente associada à capacidade da floresta de regular os fluxos hídricos e favorecer a infiltração da água no solo. A estrutura da cobertura vegetal e a composição do solo florestal permitem que grande parte da água das chuvas seja absorvida, reduzindo o escoamento superficial e contribuindo para a recarga hídrica. Nesse contexto, Nobre (2014, p. 13), destaca-se que “a água [...] infiltra-se pelo permeável solo florestal, onde é armazenada no pacote poroso do solo, ou mais abaixo, em aquíferos gigantescos, verdadeiros oceanos subterrâneos de água doce.” Esse processo evidencia a relevância da floresta para a manutenção da disponibilidade hídrica e para a estabilidade do ciclo hidrológico em escala regional.

A conservação do solo está diretamente relacionada à qualidade da água, uma vez que a redução da erosão diminui o transporte de sedimentos e poluentes para os corpos hídricos. Nesse contexto, o IPCC (2022, p. 751) afirma que “mitigation measures have the potential to positively or negatively impact [...] water availability and quality, soil productivity [...]”¹²⁶. Essa evidência demonstra que alterações no uso da terra e na cobertura vegetal afetam simultaneamente a qualidade da água e a funcionalidade do solo, evidenciando a interdependência entre os processos ecológicos responsáveis pela estabilidade ambiental. A partir dessa perspectiva, compreende-se que modificações na cobertura florestal, como o desmatamento ou a conversão do uso da terra, tendem a comprometer a disponibilidade e a qualidade da água, bem como a funcionalidade do solo. Essa interação demonstra que a degradação da cobertura vegetal compromete de forma integrada os processos ecológicos responsáveis pela estabilidade ambiental.

A infiltração da água no solo constitui um processo fundamental para o funcionamento do ciclo hidrológico, sendo diretamente influenciada pelas características do solo e pela cobertura vegetal. Nesse sentido, Alves et al. (2024, p. 1) apontam que:

¹²⁵ Tradução nossa: As florestas desempenham um papel crucial na regulação dos fluxos de água.

¹²⁶ Tradução nossa: as medidas de mitigação têm potencial para impactar positiva ou negativamente a biodiversidade, o funcionamento dos ecossistemas, a qualidade do ar, a disponibilidade e a qualidade da água e a produtividade do solo [...]

Soil water infiltration is an important component of the hydrological cycle, and it is best evaluated when the raindrop impacts the ground surface. For this reason, it is affected by changes in land use and land cover and by the characteristics and physical-hydric properties of the soil.¹²⁷

A constatação de Alves et al. (2024) evidencia que a manutenção da cobertura vegetal desempenha papel determinante na preservação da dinâmica hidrológica, na medida em que alterações no uso e na cobertura da terra modificam a capacidade de infiltração da água no solo, comprometendo um processo essencial ao funcionamento do ciclo hidrológico.

Por outro lado, a degradação da cobertura florestal compromete significativamente os processos ecológicos associados à estabilidade ambiental. Nesse sentido, Bultan et al. (2025, p. 6) destacam que “land-use change will remain the major driver of forest decline under ongoing future deforestation, reducing the 1950 forest extent by up to 25% until 2100.”¹²⁸, evidenciando que as mudanças no uso da terra desempenham papel central na redução da cobertura florestal, comprometendo a funcionalidade dos sistemas ambientais, afetando processos como a regulação hídrica e a conservação do solo. Essa constatação demonstra que o avanço do desmatamento compromete progressivamente funções ambientais essenciais, especialmente aquelas relacionadas à conservação do solo e à regulação hídrica.

No contexto brasileiro, a conservação do solo e da qualidade da água na Amazônia está diretamente associada à presença de uma cobertura vegetal densa, que atua como elemento estruturante na proteção dos sistemas naturais. Ao reduzir os efeitos das chuvas intensas sobre o solo e limitar processos de degradação, a vegetação contribui para a manutenção da qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Essa dinâmica adquire ainda maior relevância ao se considerar que a região abriga a maior bacia hidrográfica do mundo, cuja integridade depende da estabilidade desses processos ecológicos. Nesse sentido, a função exercida pela floresta não se restringe ao âmbito local, mas sustenta a conservação dos recursos hídricos em escala regional e continental.

Diante disso, compreende-se que a vegetação amazônica desempenha papel essencial na regulação integrada do solo e da água, constituindo um serviço ecossistêmico estratégico. Ao preservar a estrutura física do solo e assegurar a qualidade hídrica, a floresta contribui para a manutenção do equilíbrio ambiental e para a continuidade dos sistemas naturais que sustentam atividades humanas em diferentes regiões do país.

¹²⁷ Tradução nossa: A infiltração de água no solo é um componente importante do ciclo hidrológico, e é melhor avaliada quando a gota de chuva atinge a superfície do solo. Por esta razão, é afetada por mudanças no uso e cobertura do solo e pelas características e propriedades físico-hídricas do solo.

¹²⁸ Tradução nossa: as mudanças no uso da terra continuarão sendo o principal fator da redução florestal sob cenários de desmatamento contínuo, reduzindo a extensão da floresta de 1950 em até 25% até 2100.

Os principais processos associados à conservação do solo e à qualidade da água na Amazônia podem ser sintetizados no Quadro 21:

Quadro 21 – Síntese dos processos de conservação do solo e da qualidade da água na Amazônia

Processo ecológico	Mecanismo	Evidência científica	Impacto observado
Cobertura florestal	Proteção do solo e retenção de sedimentos	FAO (2016)	Redução da erosão e do assoreamento
Regulação hídrica	Controle do escoamento superficial	FAO (2016)	Estabilização dos fluxos de água
Infiltração no solo	Absorção e armazenamento de água	Nobre (2014); Alves et al. (2024)	Recarga hídrica e manutenção de aquíferos
Vegetação ripária	Filtragem e regulação físico-química	Silva et al. (2026)	Melhoria da qualidade da água
Mudança no uso da terra	Alteração dos processos hidrológicos	IPCC (2022)	Redução da qualidade e disponibilidade hídrica
Desmatamento	Degradação dos sistemas naturais	Boulton et al. (2025); Leal Filho et al. (2025)	Comprometimento dos serviços ecossistêmicos

Fonte: Elaboração do autor (2026)

O Quadro 21 evidencia que a conservação do solo e da qualidade da água na Amazônia resulta da interação entre processos físicos e biológicos que atuam de forma integrada na regulação do sistema hidrológico. Observa-se que a cobertura florestal exerce papel central ao controlar o escoamento e favorecer a infiltração, enquanto a vegetação associada aos cursos d’água contribui para a estabilidade dos parâmetros físico-químicos. Em contrapartida, alterações no uso da terra comprometem simultaneamente múltiplos componentes do sistema, indicando que a degradação da cobertura vegetal desencadeia efeitos encadeados sobre a funcionalidade ambiental e a disponibilidade hídrica.

4.4 Estudo comparado de programas de pagamento por serviços ambientais

A análise desenvolvida nos itens anteriores demonstrou que a floresta amazônica possui potencial significativo de geração de recursos financeiros a partir de atividades sustentáveis e da valorização dos serviços ambientais. No entanto, também foi evidenciado que tais iniciativas, embora relevantes, apresentam limitações em termos de escala, financiamento e capacidade de transformação estrutural. Nesse contexto, torna-se necessário analisar instrumentos econômicos mais abrangentes, capazes de internalizar o valor dos serviços

ambientais e promover incentivos diretos à conservação, entre os quais se destacam os programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).

Os programas de PSA constituem instrumentos econômicos baseados na compensação financeira a indivíduos ou comunidades que promovem a conservação dos ecossistemas. Nesse sentido, Wunder (2015, p. 241) afirma que “PES is not a silver bullet, but a useful tool for conservation”¹²⁹, evidenciando que esses mecanismos podem contribuir para alinhar incentivos econômicos e ambientais. Ao estabelecer uma relação direta entre conservação e remuneração, os PSA operacionalizam, na prática, o princípio do protetor-recebedor e contribuem para a internalização das externalidades ambientais positivas associadas à conservação.

De forma geral, os programas de PSA envolvem a transferência de recursos financeiros de beneficiários dos serviços ambientais para aqueles responsáveis por sua provisão. Nesse sentido, Guedes e Seehusen (2012, p. 14) afirmam que “esse instrumento reconhece o valor econômico da proteção de ecossistemas e dos usos sustentáveis e promove um incentivo econômico aos ‘provedores’ de serviços ambientais”, destacando a função dos PSA na criação de incentivos voltados à conservação ambiental. Esses mecanismos contribuem para alinhar interesses econômicos e ecológicos, favorecendo a manutenção dos serviços ambientais e a internalização das externalidades positivas associadas à conservação.

Os programas de Pagamento por Serviços Ambientais apresentam uma estrutura institucional específica baseada na articulação entre agentes econômicos, serviços ecossistêmicos e mecanismos de incentivo financeiro. A organização desses elementos permite compreender o funcionamento desses instrumentos no contexto da governança ambiental e sua aplicação na promoção da conservação dos recursos naturais. Nesse sentido, o Quadro 22 apresenta os principais componentes estruturais dos programas de Pagamento por Serviços Ambientais.

Quadro 22 – Elementos estruturais dos programas de Pagamento por Serviços Ambientais

Elemento	Descrição	Função
Provedor	Quem conserva o recurso natural	Geração do serviço ambiental
Beneficiário	Quem se beneficia do serviço	Financiamento
Serviço ambiental	Função ecológica (água, carbono, biodiversidade)	Base do pagamento
Mecanismo de pagamento	Transferência financeira	Incentivo econômico
Monitoramento	Verificação dos resultados	Garantia de efetividade

Fonte: Elaborado pelo autor.

¹²⁹ Tradução nossa: O PSA não é uma solução milagrosa, mas uma ferramenta útil para a conservação

Nesse sentido, pode-se verificar que o Quadro 22 apresenta os principais elementos estruturais dos programas de Pagamento por Serviços Ambientais, evidenciando a relação entre provedores, beneficiários, serviços ecossistêmicos e mecanismos de incentivo financeiro. A partir dessa estrutura, é possível compreender que os PSA se organizam segundo uma lógica de mercado regulado, na qual os serviços ambientais passam a ser reconhecidos como ativos econômicos.

Nesse contexto, esses instrumentos contribuem para a internalização de externalidades positivas associadas à conservação, ao estabelecer uma relação direta entre a provisão de serviços ecossistêmicos e a remuneração dos agentes responsáveis por sua manutenção. Dessa forma, os PSA representam um mecanismo relevante de correção de falhas de mercado, promovendo maior alinhamento entre incentivos econômicos e objetivos ambientais.

A aplicação prática desses programas pode ser observada em diferentes países, sendo a Costa Rica um dos casos mais emblemáticos. O programa costarriquenho de PSA, implementado na década de 1990, é amplamente reconhecido como uma experiência relevante de conservação baseada em incentivos econômicos. Nesse sentido, Le Coq et al. (2011, p. 6) destacam a “continuity and inflexions of the program of Payment for Environmental Services in Costa Rica”¹³⁰, evidenciando a consolidação e a permanência institucional desse modelo ao longo do tempo. Essa experiência demonstra que mecanismos de compensação econômica podem contribuir para a conservação florestal e para o fortalecimento de políticas ambientais baseadas em incentivos.

Outro exemplo relevante é o programa de PSA do México, que se destaca pela escala e abrangência de suas políticas ambientais. Nesse sentido, Eloy (2011, p. 4) destaca que “no México [...] os esquemas nacionais de PSA não contemplam apenas a proteção dos ecossistemas ‘naturais’, como era no início, mas agora procuram apoiar a conservação ambiental em paisagens produtivas”, evidenciando a ampliação das estratégias de conservação associadas aos programas de pagamento por serviços ambientais. Essa experiência demonstra que os PSA podem integrar conservação ambiental e atividades produtivas, envolvendo diferentes atores sociais e mecanismos públicos de financiamento.

Além dos casos internacionais, o Brasil também possui iniciativas relevantes relacionadas aos programas de Pagamento por Serviços Ambientais, especialmente no contexto amazônico. Esses mecanismos buscam incentivar práticas de conservação por meio de compensações econômicas destinadas aos provedores de serviços ambientais. Nesse sentido,

¹³⁰ Tradução nossa: continuidade e inflexões do programa de Pagamento por Serviços Ambientais na Costa Rica.

Costa (2008, p. 2) afirma que “os agricultores poderiam ser compensados pelos custos de oportunidade através de um instrumento econômico [...] o pagamento por serviços ambientais”, evidenciando que a remuneração pode funcionar como incentivo à adoção de práticas mais compatíveis com a conservação florestal. Costa (2008, p. 14) destaca ainda que “os formuladores de políticas têm utilizado os pagamentos por serviços ambientais para que os ecossistemas sejam manejados de maneira a fornecer determinados serviços ambientais”, demonstrando a relevância desses instrumentos no contexto das políticas ambientais voltadas à Amazônia.

A aplicação prática dos programas de Pagamento por Serviços Ambientais pode ser observada em diferentes contextos nacionais e internacionais, com variações quanto às fontes de financiamento, aos tipos de serviços remunerados e à escala de implementação. A análise comparada dessas experiências permite identificar padrões, potencialidades e limitações desses instrumentos. O Quadro 23 apresenta uma síntese comparativa de programas de PSA.

Quadro 23 – Comparação de programas de PSA (internacionais e nacionais)

País/Programa	Tipo de serviço	Fonte de financiamento	Escala	Resultado
Costa Rica	Carbono, biodiversidade	Impostos + usuários	Nacional	Redução do desmatamento
México	Serviços hídricos	Tarifas de água	Nacional	Conservação florestal
Brasil (Bolsa Floresta)	Conservação florestal	Fundo público/privado	Regional	Incentivo à conservação
REDD+	Carbono	Cooperação internacional	Global	Redução de emissões

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Pagiola (2008), Muñoz-Piña et al. (2008), Börner et al. (2010) e Angelsen et al. (2018).

Assim, o Quadro 23 apresenta uma síntese comparativa de programas de Pagamento por Serviços Ambientais em diferentes contextos nacionais e internacionais, evidenciando variações quanto às fontes de financiamento, aos tipos de serviços ambientais e às escalas de implementação. A partir desses elementos, é possível observar que os programas de PSA assumem diferentes configurações institucionais, adaptando-se às condições econômicas, ambientais e políticas de cada país.

Apesar dessas variações, identifica-se um elemento comum entre as experiências analisadas: a utilização de incentivos econômicos como instrumento de promoção da conservação ambiental. No entanto, a análise comparada também permite inferir a existência de limitações recorrentes, como a dependência de financiamento contínuo, a complexidade institucional e as dificuldades de expansão em larga escala. Esses fatores indicam que, embora

eficazes em contextos específicos, os PSA necessitam ser integrados a estratégias mais amplas de governança ambiental para alcançar maior efetividade.

Apesar dos resultados positivos, os programas de Pagamento por Serviços Ambientais ainda apresentam limitações relacionadas à capacidade institucional e à continuidade do financiamento. Nesse sentido, Wunder (2015, p. 241) afirma que “PES is not a silver bullet, but a useful tool for conservation”¹³¹, indicando que esses mecanismos possuem potencial relevante para a conservação ambiental, embora não sejam suficientes, isoladamente, para solucionar problemas ambientais complexos. De forma complementar, Costa (2008, p. 4) destaca que “a fonte de recursos para remunerar os serviços ambientais não foi estabelecida”, evidenciando que a sustentabilidade financeira constitui um dos principais desafios para a consolidação dos programas de PSA. Essas limitações demonstram que a efetividade desses instrumentos depende do fortalecimento institucional e da articulação entre políticas públicas, instrumentos econômicos e mecanismos permanentes de financiamento.

A análise desenvolvida ao longo deste capítulo evidencia que a floresta amazônica, quando mantida em pé, possui elevado potencial de geração de recursos financeiros por meio de diferentes estratégias econômicas, incluindo atividades sustentáveis, bioeconomia e mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais. As evidências apresentadas demonstram que a conservação ambiental pode ser compatível com a geração de renda, contribuindo para o desenvolvimento local e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos.

No entanto, a persistência de limitações relacionadas à escala, ao financiamento e à governança indica que os instrumentos atualmente disponíveis não são suficientes para promover uma transformação estrutural do modelo econômico predominante. Essa constatação revela a existência de falhas na internalização dos benefícios econômicos associados à conservação, evidenciando a necessidade de mecanismos mais abrangentes e sistematizados.

Dessa forma, torna-se necessária a construção de instrumentos capazes de operar em escala nacional e de promover maior equilíbrio na distribuição dos custos e benefícios ambientais. A superação dessas limitações exige a integração entre instrumentos econômicos, jurídicos e institucionais, fundamentando a proposta de um modelo estruturado de precificação e remuneração dos serviços ambientais, a ser desenvolvido no capítulo seguinte.

¹³¹ Tradução nossa: O PSA não é uma solução milagrosa, mas uma ferramenta útil para a conservação

5 PROPOSTA DE UM MODELO DE REMUNERAÇÃO PELOS SERVIÇOS AMBIENTAIS DA FLORESTA AMAZÔNICA

A Constituição Federal brasileira, estabelece um rígido regime de garantia de um meio ambiente ecologicamente equilibrado, determinando que tanto o Estado quanto os cidadãos possuem obrigações no tocante às ações que deverão ser realizadas para a conquista deste direito e obrigação:

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, **impondo-se ao Poder Público e à coletividade** o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.(gn)

Dentre os principais pontos importantes, este artigo, no caput e para além dele, destaca a responsabilidade compartilhada do Poder Público e da coletividade, que seriam, então, responsáveis pela defesa e preservação ambiental (esta preservação deve ser entendida, também, como conservação); destaca que o desenvolvimento sustentável, que inclui o econômico, deve respeitar o meio ambiente; estabelece uma tríplice responsabilidade aos infratores ambientais (pessoas físicas ou jurídicas), os quais estão sujeitos a sanções penais, administrativas e civis, incluindo a obrigação de reparar danos. O artigo ainda traz outras considerações no tocante à garantia da saúde e da vida de crianças e adolescentes, sendo frequentemente invocado para a proteção de populações vulneráveis, bem como outras garantias que deixaremos de destacar; pois, a finalidade, nesta pesquisa, é a de destacar a responsabilidade do Poder Público no tocante à preservação e conservação dos recursos naturais. Responsabilidade esta que não deve ser atribuída somente aos Estados Amazônicos, vez que todos os demais Estados brasileiros usufruem desta preservação/conservação, devendo arcar com estes custos e, nesta proposta de tese, objetiva-se destacar a necessidade de os demais estados não amazônicos, em contribuir para a manutenção da floresta e, conseqüentemente, pagar pelos serviços que ela gera, se for mantida.

A fundamentação legal para que os Estados não Amazônicos contribuam, pagando pelos serviços ambientais que a floresta amazônica presta está definida na Constituição Federal de 1988, que estabelece, no Federalismo ambiental, um modelo de gestão compartilhada da proteção ambiental entre União, Estados, Distrito Federal e Municípios, fundamentado no princípio do federalismo cooperativo, que estabelece competência comum para proteger o meio ambiente, com foco na descentralização e ação conjunta:

Art. 23. É **competência comum** da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios:

(...) *omissis*

III - proteger os documentos, as obras e outros bens de valor histórico, artístico e cultural, **os monumentos, as paisagens naturais notáveis e os sítios arqueológicos**;

(...) *omissis*

VI - **proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas**;

VII - **preservar as florestas, a fauna e a flora**;

VIII - fomentar a produção agropecuária e organizar o abastecimento alimentar;

(...) *omissis*

Parágrafo único. Leis complementares fixarão **normas para a cooperação entre a União e os Estados, o Distrito Federal e os Municípios, tendo em vista o equilíbrio do desenvolvimento e do bem-estar em âmbito nacional.** (gns)

A competência comum, dos entes federados reside no fato de que todos os entes federados devem atuar juntos e/ou em conjunto e, no caso dessa pesquisa, todos devem colaborar na proteção do meio ambiente, buscando o desenvolvimento e equilíbrio socioeconômico de todos os entes da federação brasileira. E o parágrafo único deste artigo 23 da CF/88, estabelece a necessidade de leis complementares para cooperação na busca deste equilíbrio.

Desta forma, a proposta que se apresentará, a seguir, está prevista constitucionalmente e é inédita, porque ainda não foi explorada pelo legislador e por nenhum doutrinador.

Essa realidade evidencia que, embora a proteção ambiental seja um dever compartilhado, os custos associados à conservação não são distribuídos de forma equilibrada, o que justifica a construção de mecanismos de compensação entre as unidades federativas.

5.1 Métodos de valoração econômica dos serviços ambientais

A construção de mecanismos de compensação ambiental exige a definição de critérios capazes de mensurar os benefícios gerados pelos serviços ecossistêmicos. Nesse contexto, a valoração econômica dos serviços ambientais constitui etapa fundamental, na medida em que permite atribuir parâmetros objetivos para a estimativa desses benefícios e para a definição de instrumentos de remuneração.

De acordo com Motta (1997, p. 1), “determinar o valor econômico de um recurso ambiental é estimar o valor monetário deste em relação aos outros bens e serviços disponíveis na economia”. Essa definição evidencia que a valoração econômica não implica necessariamente a mercantilização da natureza, mas a atribuição de parâmetros capazes de tornar visíveis os benefícios fornecidos pelos ecossistemas. Dessa forma, a valoração contribui

para corrigir falhas de mercado associadas à ausência de precificação dos serviços ambientais, permitindo maior racionalidade na formulação de políticas públicas.

A relação entre os ecossistemas naturais e o bem-estar humano ocupa posição central nos debates contemporâneos sobre sustentabilidade e desenvolvimento. Nesse sentido, Costanza et al. (2017, p. 1) afirmam que “ecosystem services contribute to human well-being and sustainable development”¹³², demonstrando que as funções ecológicas sustentam atividades econômicas e condições essenciais à qualidade de vida. De forma complementar, o relatório do IPBES (2019) destaca que a degradação dos ecossistemas compromete a estabilidade econômica e social, ampliando riscos associados às mudanças climáticas e à perda de biodiversidade. Essa perspectiva reforça a importância da incorporação dos serviços ecossistêmicos nas dinâmicas econômicas contemporâneas.

No âmbito metodológico, existem diferentes abordagens para a estimativa do valor econômico dos serviços ambientais, as quais podem ser agrupadas em métodos de valoração indireta e métodos de valoração direta, a depender da forma como os valores são inferidos. Os métodos indiretos baseiam-se na observação do comportamento dos agentes econômicos em mercados relacionados, enquanto os métodos diretos utilizam preferências declaradas para estimar valores em situações nas quais não existem mercados associados.

Os métodos de valoração indireta permitem inferir o valor dos recursos ambientais a partir de suas interações com outros bens econômicos. Entre esses métodos, destaca-se o método do preço hedônico. Nesse sentido, Kuminoff, Parmeter e Pope (2010, p. 4) afirmam que “hedonic models are widely used to estimate the implicit value of environmental amenities”¹³³, indicando que atributos ambientais influenciam diretamente os preços de mercado e permitem inferir a disposição a pagar dos indivíduos.

Outro método relevante é o custo de viagem, amplamente utilizado para estimar o valor recreativo de áreas naturais. Nesse sentido, Parsons (2017, p. 15) destaca que “the travel cost method remains one of the primary tools for valuing recreational resources”¹³⁴, demonstrando que os gastos de deslocamento podem funcionar como indicador da disposição dos usuários em usufruir serviços ambientais recreativos.

¹³² Tradução nossa: os serviços ecossistêmicos contribuem para o bem-estar humano e para o desenvolvimento sustentável.

¹³³ Tradução nossa: os modelos hedônicos são amplamente utilizados para estimar o valor implícito de amenidades ambientais.

¹³⁴ Tradução nossa: o método do custo de viagem permanece como uma das principais ferramentas para valorar recursos recreativos.

De forma complementar, destaca-se o método da produção sacrificada, que estima o valor ambiental a partir das perdas econômicas associadas à degradação dos recursos naturais. Nesse sentido, Barbier (2019, p. 12) afirma que “ecosystem degradation can have measurable impacts on economic productivity”¹³⁵, evidenciando que a perda de serviços ambientais afeta diretamente atividades econômicas dependentes da qualidade ambiental.

Por outro lado, os métodos de valoração direta buscam estimar o valor dos serviços ambientais a partir das preferências declaradas pelos indivíduos, especialmente em contextos nos quais não existem mercados associados. O principal instrumento dessa abordagem é o método de valoração contingente. Nesse sentido, Johnston et al. (2017, p. 320) afirmam que “stated preference methods are essential for valuing non-market environmental goods”¹³⁶, demonstrando que esses métodos permitem atribuir valor econômico a bens ambientais não comercializados.

Esses métodos diferem não apenas quanto à forma de obtenção dos dados, mas também quanto à sua capacidade de capturar diferentes dimensões do valor econômico, incluindo valores de uso e de não uso. De modo geral, os métodos indiretos são mais adequados para bens ambientais que possuem mercados associados, enquanto os métodos diretos permitem estimar valores em situações nas quais esses mercados não existem, ampliando o escopo da análise econômica ambiental.

A síntese dos principais métodos de valoração econômica dos serviços ambientais pode ser observada no Quadro 24.

Quadro 24 – Métodos de valoração econômica dos serviços ambientais

Método	Tipo	Base de cálculo	Aplicação
Preço hedônico	Indireto	Variação de preços de mercado	Valoração de atributos ambientais
Custo de viagem	Indireto	Gastos de deslocamento	Valoração de áreas recreativas
Produção sacrificada	Indireto	Perdas econômicas	Impactos ambientais na produção
Valoração contingente	Direto	Disposição a pagar declarada	Bens ambientais sem mercado

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base em Kuminoff, Parmeter e Pope (2010), Parsons (2017), Barbier (2019) e Johnston et al. (2017).

O Quadro 24 apresenta os principais métodos de valoração econômica dos serviços ambientais, evidenciando diferenças quanto à forma de obtenção dos dados e às situações em

¹³⁵ Tradução nossa: a degradação dos ecossistemas pode gerar impactos mensuráveis sobre a produtividade econômica.

¹³⁶ Tradução nossa: os métodos de preferência declarada são essenciais para valorar bens ambientais sem mercado.

que são aplicáveis. A partir desses elementos, observa-se que a escolha do método depende da disponibilidade de informações, da natureza do serviço ambiental e do contexto de análise, sendo necessário considerar as limitações e potencialidades de cada abordagem.

No contexto das políticas públicas ambientais, esses métodos encontram aplicação direta na formulação de instrumentos de incentivo à conservação, especialmente nos mecanismos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Esses instrumentos utilizam estimativas econômicas para definir valores de compensação destinados a agentes responsáveis pela conservação dos ecossistemas, permitindo a internalização dos benefícios ambientais e a correção de falhas de mercado.

Segundo Wunder (2015, p. 235), “payments for ecosystem services are effective conservation tools”¹³⁷, evidenciando que a criação de incentivos econômicos pode alinhar interesses individuais e coletivos em favor da proteção ambiental.

Nesse sentido, Engel, Pagiola e Wunder (2008, p. 663) afirmam que “payments for environmental services require clear definition of services, buyers, sellers and payment conditions”¹³⁸, indicando que a efetividade desses instrumentos depende de critérios bem definidos.

De forma complementar, a (OECD, 2021, p. 24) destaca que “well-designed environmental policy instruments require clear valuation frameworks and stable institutional arrangements”¹³⁹, reforçando que a sustentabilidade financeira e a equidade na distribuição dos recursos dependem de arranjos institucionais robustos.

Dessa forma, a valoração econômica dos serviços ambientais constitui instrumento fundamental para a integração entre economia, direito e políticas públicas ambientais, ao fornecer bases técnicas para a definição de mecanismos de incentivo à conservação. No entanto, a aplicação desses métodos exige cautela metodológica e institucional, especialmente em contextos complexos como o amazônico, nos quais a diversidade ecológica e social impõe desafios adicionais à mensuração e à implementação de instrumentos econômicos. Esses aspectos reforçam a necessidade do desenvolvimento de modelos estruturados de valoração e remuneração ambiental, conforme será aprofundado no item seguinte.

¹³⁷ Tradução nossa: os pagamentos por serviços ecossistêmicos são instrumentos eficazes de conservação.

¹³⁸ Tradução nossa: os pagamentos por serviços ambientais exigem definição clara dos serviços, compradores, vendedores e condições de pagamento.

¹³⁹ Tradução nossa: instrumentos de política ambiental bem estruturados exigem modelos claros de valoração e arranjos institucionais estáveis.

5.2 Externalidades ambientais e a necessidade de compensação

A análise da valoração econômica dos serviços ambientais, desenvolvida no item anterior, evidencia que os benefícios proporcionados pelos ecossistemas naturais podem ser estimados e incorporados aos processos de tomada de decisão. Contudo, a mensuração desses valores não resolve, por si só, a forma como os custos e benefícios ambientais são distribuídos entre diferentes agentes e regiões, especialmente em contextos caracterizados por elevada heterogeneidade territorial, como o da Amazônia. Nesse cenário, torna-se necessário compreender o papel das externalidades ambientais como elemento central para a formulação de mecanismos de compensação.

As externalidades ambientais correspondem aos efeitos indiretos das atividades econômicas sobre terceiros que não participam diretamente das transações de mercado. Nesse sentido, Baumol (1972, p. 307) define que “externalities arise when economic activities impose costs or benefits on others not reflected in market prices”¹⁴⁰, o que indica que determinadas atividades geram custos ou benefícios a terceiros sem que esses efeitos sejam incorporados aos preços de mercado, resultando na ausência de compensação pelos impactos produzidos.

No caso das externalidades positivas, determinadas atividades geram benefícios que se estendem além dos agentes que as produzem, sem que haja compensação econômica correspondente. Assim, a OECD (2021, p. 17) esclarece que, “positive externalities occur when benefits extend beyond the agents directly involved in economic transactions”¹⁴¹, evidenciando que tais benefícios, embora existentes, não são apropriados economicamente por quem os produz, o que reduz os incentivos à sua manutenção.

A ausência de mecanismos capazes de internalizar os benefícios ambientais associados aos ecossistemas naturais reduz os incentivos à sua manutenção. Nesse contexto, a teoria econômica clássica identifica as externalidades como uma das principais falhas de mercado. Nesse sentido, Pigou (1920, p. 183) argumenta que a divergência entre custos privados e custos sociais compromete a eficiência econômica, na medida em que decisões individuais deixam de considerar os efeitos gerados sobre terceiros. Em linha com essa abordagem, Berta et al. (2020, p. 84) destacam que “environmental externalities remain a central issue in environmental policy

¹⁴⁰ Tradução nossa: as externalidades surgem quando atividades econômicas impõem custos ou benefícios a terceiros que não são refletidos nos preços de mercado.

¹⁴¹ Tradução nossa: externalidades positivas ocorrem quando os benefícios se estendem além dos agentes diretamente envolvidos nas transações econômicas.

design”¹⁴², indicando que a dificuldade de internalização desses efeitos continua sendo um elemento estruturante na formulação de políticas ambientais.

Essa problemática torna-se ainda mais evidente, especialmente no contexto das mudanças climáticas globais, cujos impactos extrapolam fronteiras territoriais e econômicas. Nesse sentido, Stern (2007, p. xviii) afirma que “climate change is the greatest market failure the world has ever seen”¹⁴³, o que reforça que as externalidades ambientais, especialmente no contexto climático, atingem escala sistêmica e produzem efeitos que ultrapassam os limites dos mercados tradicionais. Essa interpretação é corroborada por avaliações recentes, O IPCC (2021, p. 5) afirma que “climate change is widespread, rapid and intensifying”¹⁴⁴, indicando que os impactos associados a essas externalidades já se manifestam de forma ampla e crescente.

No contexto amazônico, as externalidades ambientais assumem características específicas, decorrentes da relevância global dos serviços prestados pela floresta. Nesse sentido, Nobre et al. (2016, p. 10759) afirmam que “the Amazon plays a critical role in regulating the climate system”¹⁴⁵, evidenciando que os efeitos da floresta extrapolam o âmbito local e se projetam sobre o sistema climático em escala mais ampla, caracterizando externalidades positivas de grande magnitude.

Costanza et al. (1997, p. 253) afirmam que “ecosystem services are the benefits human populations derive from ecosystem functions”¹⁴⁶, evidenciando que os serviços ambientais gerados pela floresta amazônica beneficiam amplamente a sociedade, embora tais benefícios não sejam devidamente remunerados.

Entretanto, os custos associados à conservação desses serviços permanecem concentrados nos estados amazônicos, que enfrentam restrições ao uso econômico do território em função da necessidade de preservação ambiental. Essa configuração evidencia uma assimetria na distribuição dos custos e benefícios ambientais, na qual os ganhos são difusos, enquanto os encargos são territorialmente concentrados, o que pode gerar incentivos econômicos desfavoráveis à conservação.

Diante desse cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de mecanismos capazes de promover a internalização das externalidades ambientais positivas, assegurando que os agentes responsáveis pela conservação sejam devidamente compensados pelos benefícios gerados à

¹⁴² Tradução nossa: as externalidades ambientais permanecem uma questão central na formulação de políticas ambientais.

¹⁴³ Tradução nossa: a mudança climática é a maior falha de mercado que o mundo já viu.

¹⁴⁴ Tradução nossa: a mudança climática é generalizada, rápida e está se intensificando.

¹⁴⁵ Tradução nossa: a Amazônia desempenha um papel crítico na regulação do sistema climático.

¹⁴⁶ Tradução nossa: os serviços ecossistêmicos são os benefícios que as populações humanas obtêm das funções dos ecossistemas.

coletividade. Nesse contexto, o princípio do protetor-recebedor emerge como uma diretriz relevante, ao estabelecer que aqueles que contribuem para a proteção ambiental devem ser economicamente recompensados.

Além de sua dimensão econômica, a compensação ambiental também apresenta relevância sob a perspectiva da justiça distributiva, ao reconhecer que os custos da conservação não devem recair de forma desproporcional sobre determinadas regiões ou grupos sociais. No caso da Amazônia, essa perspectiva implica a necessidade da construção de arranjos institucionais capazes de redistribuir os encargos ambientais de maneira mais equilibrada entre as unidades federativas.

Apesar do reconhecimento teórico da necessidade de internalização das externalidades, a implementação de mecanismos efetivos de compensação ainda enfrenta desafios significativos. A ausência de instrumentos suficientemente robustos, a dependência de fontes de financiamento instáveis e a fragmentação das políticas públicas dificultam a consolidação de sistemas de remuneração capazes de operar em escala compatível com a importância da floresta amazônica.

Dessa forma, a análise das externalidades ambientais nos mostra que a conservação da Amazônia não pode ser compreendida apenas como um dever jurídico ou ético, mas como uma atividade que gera benefícios econômicos relevantes e mensuráveis. No entanto, a ausência de mecanismos eficazes de compensação impede a adequada internalização desses benefícios, reforçando a necessidade de examinar os instrumentos econômicos e financeiros atualmente disponíveis para a promoção da conservação ambiental, tema que será desenvolvido no item seguinte.

5.3 Instrumentos econômicos e financeiros para a conservação da floresta

A necessidade de internalização das externalidades ambientais associadas à conservação da floresta amazônica tem impulsionado o desenvolvimento de diferentes instrumentos econômicos e financeiros voltados à proteção dos ecossistemas. Esses mecanismos buscam incorporar o valor dos serviços ambientais aos processos econômicos, criando incentivos voltados à conservação ambiental. No entanto, sua efetividade depende da capacidade de superar as limitações inerentes à lógica de mercado e às estruturas institucionais existentes.

De forma geral, instrumentos econômicos são concebidos como mecanismos capazes de alinhar incentivos econômicos à proteção ambiental. De acordo com OECD (2021, p. 18),

“market-based instruments can provide incentives for environmental protection by aligning economic and ecological objectives”¹⁴⁷, o que indica que tais instrumentos operam por meio da criação de incentivos econômicos voltados à conservação. A UNEP (2019, p. 27) também afirma que “economic instruments are increasingly used to address environmental challenges through incentive-based approaches”¹⁴⁸, evidenciando a expansão desses mecanismos no âmbito das políticas ambientais contemporâneas.

Nesse contexto, os principais instrumentos econômicos e financeiros utilizados para a conservação ambiental podem ser sintetizados conforme apresentado no Quadro 25.

Quadro 25 – Instrumentos econômicos e financeiros para a conservação ambiental

Instrumento	Objetivo principal	Lógica econômica	Principais limitações
REDD+	Redução do desmatamento e emissões	Mercado de carbono / incentivos climáticos	Mensuração, governança e incerteza regulatória
Fundos climáticos	Financiamento de ações ambientais	Transferências internacionais	Instabilidade e acesso restrito
Fundo Amazônia	Apoio à conservação e controle do desmatamento	Pagamento por resultados	Dependência política e institucional
PSA	Remuneração por serviços ambientais	Incentivo econômico direto	Escala, financiamento e monitoramento

Fonte: Elaboração própria com base em OECD (2021), UNFCCC (2014), Wunder (2015), Engel, Pagiola e Wunder (2008), entre outros.

A síntese apresentada no Quadro 25 mostra que, embora os instrumentos compartilhem o objetivo de promover a conservação ambiental, eles operam por meio de lógicas distintas e apresentam limitações específicas, o que reforça a necessidade de análise crítica de sua efetividade.

No âmbito das políticas climáticas, o mecanismo de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+) tem se consolidado como uma estratégia relevante. No âmbito das políticas climáticas internacionais, conforme UNFCCC (2014, p. 8), “REDD+ provides incentives for developing countries to reduce emissions from deforestation and forest degradation”¹⁴⁹, o que demonstra a associação entre conservação florestal e redução de emissões de carbono. Essa vinculação insere a proteção florestal no âmbito das políticas climáticas globais. Adicionalmente, segundo Angelsen et al. (2018, p. 4), “REDD+ has the potential to contribute significantly to climate change mitigation while supporting forest

¹⁴⁷ Tradução nossa: instrumentos baseados no mercado podem fornecer incentivos para a proteção ambiental ao alinhar objetivos econômicos e ecológicos.

¹⁴⁸ Tradução nossa: instrumentos econômicos estão sendo cada vez mais utilizados para enfrentar desafios ambientais por meio de abordagens baseadas em incentivos.

¹⁴⁹ Tradução nossa: o REDD+ fornece incentivos para que países em desenvolvimento reduzam as emissões provenientes do desmatamento e da degradação florestal.

conservation”¹⁵⁰, indicando que o instrumento articula objetivos ambientais e climáticos de forma integrada, ainda que essa integração dependa de condições institucionais específicas.

Entretanto, a operacionalização do REDD+ apresenta limitações relevantes. Nesse sentido, conforme FAO (2020, p. 21), “REDD+ implementation faces challenges related to governance, measurement and benefit sharing”¹⁵¹, o que demonstra que sua efetividade depende de estruturas institucionais robustas e mecanismos confiáveis de mensuração. Busch e Ferretti-Gallon (2017, p. 6) observam que “uncertainties in carbon accounting and policy frameworks limit the effectiveness of REDD+ initiatives”¹⁵², evidenciando que incertezas técnicas e normativas comprometem a previsibilidade e a estabilidade do instrumento.

No âmbito do financiamento ambiental, os fundos climáticos internacionais têm sido utilizados como instrumentos relevantes de apoio à conservação. No campo do financiamento climático, a OECD (2021, p. 42) afirma que “climate funds play a crucial role in supporting mitigation and adaptation efforts in developing countries”¹⁵³, o que indica que esses mecanismos viabilizam a implementação de políticas ambientais em contextos de restrição fiscal. Ao tratar do papel do financiamento climático internacional, a UNFCCC (2021, p. 15) destaca que, “international climate finance is essential for enabling developing countries to pursue low-carbon and climate-resilient development pathways”¹⁵⁴, evidenciando que tais instrumentos são fundamentais para a transição ambiental, especialmente em países em desenvolvimento.

Contudo, esses mecanismos apresentam limitações estruturais. Segundo IPCC (2021, p. 1796), “climate finance flows remain insufficient to meet the scale of global environmental challenges”¹⁵⁵, o que revela a insuficiência dos recursos disponíveis diante da magnitude dos desafios ambientais globais. A OECD (2022, p. 33) aponta que “access to climate finance is often constrained by institutional and procedural barriers”¹⁵⁶, evidenciando que dificuldades operacionais e institucionais limitam o acesso a esses recursos.

¹⁵⁰ Tradução nossa: o REDD+ possui potencial para contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas ao mesmo tempo em que apoia a conservação florestal.

¹⁵¹ Tradução nossa: a implementação do REDD+ enfrenta desafios relacionados à governança, mensuração e repartição de benefícios.

¹⁵² Tradução nossa: incertezas na contabilização de carbono e nos marcos regulatórios limitam a efetividade das iniciativas de REDD+.

¹⁵³ Tradução nossa: os fundos climáticos desempenham papel crucial no apoio aos esforços de mitigação e adaptação em países em desenvolvimento.

¹⁵⁴ Tradução nossa: o financiamento climático internacional é essencial para permitir que países em desenvolvimento adotem trajetórias de desenvolvimento de baixo carbono e resilientes ao clima.

¹⁵⁵ Tradução nossa: os fluxos de financiamento climático permanecem insuficientes para atender à escala dos desafios ambientais globais.

¹⁵⁶ Tradução nossa: o acesso ao financiamento climático é frequentemente limitado por barreiras institucionais e procedimentais.

No contexto brasileiro, o Fundo Amazônia representa uma experiência relevante de financiamento da conservação ambiental. Nesse sentido, segundo BNDES (2020, p. 9), “the Amazon Fund supports projects aimed at preventing, monitoring and combating deforestation”¹⁵⁷, o que demonstra sua atuação direta na proteção da floresta. Adicionalmente, conforme BNDES (2021, p. 14), “the fund is based on results-based payments linked to reductions in deforestation”¹⁵⁸, indicando que o financiamento está condicionado ao desempenho ambiental, o que representa um avanço em relação a modelos tradicionais.

Entretanto, a estabilidade desse mecanismo depende de fatores externos. Nesse sentido, segundo Correa et al. (2019, p. 11), “the sustainability of the Amazon Fund depends on continued international cooperation and financial contributions”¹⁵⁹, o que evidencia sua dependência de fluxos internacionais de financiamento. Garcia et al. (2020, p. 7) ressaltam que “political and institutional factors can affect the continuity and effectiveness of the fund”¹⁶⁰, indicando que sua continuidade está sujeita a variações no contexto político e institucional.

Entre os instrumentos analisados, o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) destaca-se como aquele mais diretamente voltado à internalização das externalidades ambientais positivas. Nesse sentido, segundo Wunder (2015, p. 241), “payments for ecosystem services are voluntary transactions where a well-defined environmental service is bought by a service buyer from a service provider if and only if the provider secures service provision”¹⁶¹, o que evidencia que o PSA estabelece uma relação contratual baseada no desempenho ambiental. De forma complementar, conforme Engel, Pagiola e Wunder (2008, p. 664), “PES programs aim to create incentives for land users to manage ecosystems in ways that provide environmental services”¹⁶², indicando que o instrumento busca alinhar comportamento econômico e conservação ambiental.

Essa característica confere ao PSA maior aderência à lógica da internalização das externalidades, ao reconhecer explicitamente o valor dos serviços ambientais. Contudo, suas limitações também são reconhecidas. Nesse sentido, segundo Engel, Pagiola e Wunder (2008,

¹⁵⁷ Tradução nossa: o Fundo Amazônia apoia projetos voltados à prevenção, monitoramento e combate ao desmatamento.

¹⁵⁸ Tradução nossa: o fundo é baseado em pagamentos por resultados vinculados à redução do desmatamento.

¹⁵⁹ Tradução nossa: a sustentabilidade do Fundo Amazônia depende da continuidade da cooperação internacional e das contribuições financeiras.

¹⁶⁰ Tradução nossa: fatores políticos e institucionais podem afetar a continuidade e a efetividade do fundo.

¹⁶¹ Tradução nossa: os pagamentos por serviços ecossistêmicos são transações voluntárias nas quais um serviço ambiental bem definido é adquirido por um comprador de serviços de um provedor, desde que este assegure a provisão do serviço.

¹⁶² Tradução nossa: os programas de PSA buscam criar incentivos para que usuários da terra administrem os ecossistemas de maneiras que forneçam serviços ambientais.

p. 665), “payments for environmental services are not a panacea”¹⁶³, o que demonstra que esses mecanismos não são suficientes quando considerados isoladamente. Wunder (2015, p. 237) ressalta que “the effectiveness of PES depends on institutional design, monitoring and long-term funding”¹⁶⁴, evidenciando que sua implementação depende de condições estruturais específicas.

Dessa forma, embora os instrumentos econômicos e financeiros existentes — incluindo REDD+, fundos climáticos, o Fundo Amazônia e, especialmente, o Pagamento por Serviços Ambientais — representem avanços importantes na tentativa de internalizar as externalidades ambientais, sua atuação permanece limitada diante da escala territorial, da complexidade socioeconômica e da magnitude dos serviços ambientais prestados pela floresta amazônica.

Nesse contexto, observa-se que, embora o PSA apresente maior aderência à lógica da internalização das externalidades, sua efetividade depende de fontes estáveis de financiamento e de mecanismos institucionais capazes de operar em escala compatível com a relevância da Amazônia, o que ainda não se verifica de forma consolidada.

Essa limitação evidencia que a conservação da floresta não pode depender exclusivamente de instrumentos baseados em incentivos pontuais, exigindo a construção de mecanismos mais abrangentes, capazes de estruturar sistemas permanentes de remuneração dos serviços ambientais, de forma contínua, previsível e equitativa.

Diante dessas considerações, torna-se necessário avançar na formulação de um modelo que permita não apenas incentivar a conservação, mas também redistribuir os encargos ambientais entre as unidades federativas brasileiras, de modo a refletir a assimetria existente entre os benefícios gerados pela Amazônia e os custos suportados pelos estados que a compõem, tema que será desenvolvido no item seguinte.

5.4 Proposta de remuneração, estrutura do cálculo e aplicação do modelo de remuneração

A proposta de remuneração baseada na capacidade econômica das unidades federativas surge como alternativa para superar as limitações dos instrumentos econômicos tradicionais e enfrentar a assimetria existente entre a geração de benefícios ambientais e a distribuição dos custos de sua manutenção. Considerando que os serviços ambientais prestados pela floresta

¹⁶³ Tradução nossa: os pagamentos por serviços ambientais não são uma solução universal.

¹⁶⁴ Tradução nossa: a efetividade do PSA depende do desenho institucional, do monitoramento e do financiamento de longo prazo.

amazônica produzem efeitos positivos em escala nacional, torna-se necessário estruturar um mecanismo que permita redistribuir os encargos da conservação de forma proporcional à capacidade econômica dos estados. Nesse contexto, a construção de um modelo de compensação financeira baseado em critérios econômicos e territoriais visa promover maior equidade federativa, internalizando externalidades ambientais e fortalecendo a governança ambiental no âmbito do federalismo brasileiro.

a) Definição do indicador econômico

Nesse contexto, propõe-se a formulação de um modelo de remuneração baseado na utilização de indicadores econômicos, como o Produto Interno Bruto (PIB) ou o Valor Adicionado Bruto (VAB) das unidades federativas, como parâmetros para a definição das contribuições financeiras destinadas à conservação da floresta amazônica. A utilização desses indicadores possibilita a definição de critérios objetivos e comparáveis, contribuindo para a transparência e a previsibilidade do modelo.

A definição do indicador econômico a ser adotado constitui etapa fundamental para a consistência metodológica do modelo. A escolha dos indicadores influencia diretamente a forma como os fenômenos são interpretados e operacionalizados. Nesse sentido, conforme Stiglitz, Sen e Fitoussi (2009, p. 9), “what we measure affects what we do”¹⁶⁵, o que indica que a seleção dos parâmetros de mensuração condiciona os resultados e as decisões associadas à análise econômica.

O Produto Interno Bruto (PIB) corresponde ao valor total dos bens e serviços finais produzidos em determinado território em um dado período, sendo amplamente utilizado como indicador de desempenho econômico. Nesse sentido, o IBGE (2021) define que o PIB “é a soma de todos os bens e serviços finais produzidos por um país, estado ou município em um determinado período”.

Por sua vez, o Valor Adicionado Bruto (VAB) representa o valor efetivamente gerado pelas atividades produtivas. Conforme o IBGE (2021), o VAB “é o valor que a atividade econômica adiciona aos bens e serviços consumidos no seu processo produtivo”.

No contexto desta pesquisa, o Produto Interno Bruto (PIB) e o Valor Adicionado Bruto (VAB) apresentam-se como alternativas relevantes para a mensuração da capacidade econômica das unidades federativas. Entretanto, a utilização do PIB apresenta limitações, na

¹⁶⁵ Tradução nossa: o que medimos afeta o que fazemos.

medida em que incorpora componentes que nem sempre refletem de forma direta a geração de valor no território considerado.

Diante dessas limitações, opta-se pela utilização do Valor Adicionado Bruto (VAB) como principal indicador econômico do modelo. O VAB permite mensurar de forma mais precisa a contribuição efetiva das atividades produtivas em cada unidade federativa, ao considerar o valor gerado em cada etapa do processo produtivo. Essa característica torna o indicador mais adequado para a análise da capacidade econômica regional, especialmente quando o objetivo é estabelecer critérios de distribuição de encargos ambientais.

O VAB apresenta maior aderência à lógica do modelo proposto, na medida em que possibilita uma aproximação mais direta entre a estrutura produtiva dos estados e sua capacidade contributiva para o financiamento da conservação ambiental. Dessa forma, sua utilização contribui para aumentar a consistência metodológica do modelo, ao alinhar o critério de distribuição dos encargos à dinâmica econômica efetiva das unidades federativas.

A partir dessa definição, torna-se possível estruturar os critérios de cálculo das contribuições financeiras, bem como os mecanismos de distribuição dos recursos destinados à conservação da floresta amazônica, aspectos que serão detalhados na sequência.

b) Estrutura de cálculo do modelo de remuneração

A operacionalização do modelo de remuneração dos serviços ambientais amazônicos requer a definição de critérios objetivos para a distribuição dos encargos financeiros entre as unidades federativas. Nesse contexto, propõe-se a utilização Valor Adicionado Bruto (VAB) como base para a estruturação do sistema, de modo a refletir a capacidade contributiva dos entes envolvidos na proteção ambiental.

A adoção do Valor Adicionado Bruto (VAB) como referência para o cálculo das contribuições justifica-se por representar o valor efetivamente adicionado pelas atividades produtivas em cada unidade federativa, refletindo de forma mais precisa a riqueza gerada e sua capacidade econômica. Ao mensurar apenas o valor agregado em cada etapa do processo produtivo, o VAB evita duplicidades inerentes ao processo de produção e constitui indicador mais adequado para a distribuição dos encargos financeiros previstos no modelo, permitindo compatibilizar a responsabilidade ambiental com a capacidade contributiva dos estados.

A partir dessa lógica, o modelo propõe a definição de um parâmetro α , correspondente a uma fração da riqueza gerada em cada unidade federativa, destinado ao financiamento do

sistema de remuneração ambiental. Para fins de simulação, adota-se o percentual de 0,5%, valor considerado adequado por representar uma parcela reduzida da atividade econômica dos estados, sem comprometer significativamente suas estruturas fiscais.

Quando considerado de forma agregada, esse percentual possibilita a geração de recursos em escala suficiente para viabilizar a implementação de mecanismos de compensação ambiental compatíveis com a relevância ecológica da floresta amazônica.

Ressalte-se, contudo, que o valor atribuído ao parâmetro α possui caráter referencial, podendo ser ajustado conforme diretrizes de política pública, disponibilidade fiscal e objetivos específicos do sistema de remuneração ambiental, conferindo flexibilidade ao modelo proposto.

Dessa forma, estabelece-se, a seguir, a metodologia adotada para a operacionalização do modelo, estruturada nas seguintes etapas: i) Contribuição das unidades federativas; ii) Formação do fundo de remuneração ambiental; iii) Distribuição dos recursos entre as unidades federativas com áreas integrantes do bioma Amazônia; e iv) Formulação matemática consolidada do modelo.

i) Contribuição das unidades federativas não amazônicas

A contribuição das unidades federativas ao sistema de remuneração dos serviços ambientais amazônicos será atribuída exclusivamente aos estados brasileiros que não possuem áreas inseridas no bioma Amazônia. Para os fins deste modelo, consideram-se unidades federativas não amazônicas aquelas que não possuem áreas integrantes do bioma Amazônia e que, em razão dessa condição, integram o grupo de contribuintes do mecanismo proposto. Essa delimitação decorre da própria lógica do modelo proposto, segundo a qual os estados não amazônicos usufruem dos serviços ambientais prestados pela floresta, embora não suportem diretamente os custos de sua conservação. Assim, suas contribuições destinam-se à formação do fundo de remuneração ambiental, responsável pelo financiamento dos mecanismos de compensação previstos nesta pesquisa.

A contribuição das unidades federativas ao sistema de remuneração dos serviços ambientais amazônicos é definida a partir da aplicação do parâmetro α sobre a base econômica de cada estado, representada pelo Valor Adicionado Bruto (VAB). Essa estrutura permite estabelecer um critério objetivo e proporcional para a distribuição dos encargos financeiros, alinhando a contribuição de cada ente à sua capacidade econômica.

Formalmente, considerando que a contribuição corresponde à aplicação do parâmetro α sobre o Valor Adicionado Bruto (VAB) de cada unidade federativa, obtém-se a seguinte expressão matemática:

$$C_i = \alpha \times V_i$$

Onde:

C_i contribuição financeira do estado i

α percentual de contribuição definido para o sistema

V_i Valor Adicionado Bruto do estado i

Essa formulação assegura que as contribuições dos estados não amazônicos ocorram de forma proporcional à atividade econômica de cada unidade federativa, evitando distorções associadas à adoção de valores fixos ou critérios arbitrários. Ao vincular o financiamento à capacidade econômica, o modelo promove maior equidade na alocação dos encargos ambientais, reconhecendo que os benefícios decorrentes dos serviços ecossistêmicos amazônicos são amplamente distribuídos em escala nacional.

A adoção do Valor Adicionado Bruto (VAB) permite a aplicação do modelo com base em dados públicos e regularmente atualizados, garantindo transparência, replicabilidade e comparabilidade entre as unidades federativas. Essa característica contribui para a viabilidade operacional do sistema, ao facilitar sua implementação em diferentes contextos institucionais.

A utilização do VAB também reforça a consistência metodológica do modelo, por representar o valor efetivamente adicionado pelas atividades produtivas em cada unidade federativa, refletindo de forma mais precisa a capacidade econômica dos estados. Dessa forma, sua adoção contribui para uma mensuração mais adequada da capacidade contributiva e para uma distribuição dos encargos financeiros compatível com a dinâmica econômica regional.

Por fim, a estrutura proposta permite a adaptação do modelo a diferentes cenários de política pública, possibilitando ajustes no valor do parâmetro α , conforme as necessidades de financiamento e os objetivos do sistema de remuneração ambiental.

ii) Formação do fundo de remuneração ambiental

A formação do fundo de remuneração ambiental decorre da agregação das contribuições financeiras realizadas pelos estados brasileiros que não possuem áreas integrantes do bioma

Amazônia, constituindo o mecanismo central de financiamento do modelo proposto. O fundo possui natureza arrecadatória e redistributiva, sendo destinado ao recebimento das contribuições calculadas na etapa anterior e à posterior distribuição dos recursos às unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia.

Formalmente, o valor total do fundo pode ser expresso pela seguinte relação:

$$F = \sum_{i=1}^n C_i$$

Onde:

F valor total do fundo de remuneração ambiental

C_i contribuição financeira do estado i

n número total de estados contribuintes

O volume total de recursos disponíveis no fundo está diretamente relacionado à atividade econômica agregada dos estados contribuintes, sendo proporcional ao conjunto da riqueza por eles gerada. Dessa forma, o modelo estabelece uma vinculação direta entre a capacidade econômica dessas unidades federativas e o financiamento da conservação da Floresta Amazônica.

Essa formulação evidencia que o volume de recursos do fundo não é fixo, variando de acordo com o desempenho econômico dos estados contribuintes, uma vez que está diretamente vinculado ao Valor Adicionado Bruto (VAB). Nesse sentido, o modelo apresenta caráter dinâmico, ajustando-se automaticamente às condições econômicas. Assim, em períodos de crescimento econômico, observa-se o aumento das contribuições e, conseqüentemente, do montante disponível para a conservação ambiental; por outro lado, em cenários de retração econômica, ocorre redução proporcional dos recursos, sem a imposição de encargos fixos aos estados, preservando a coerência com sua capacidade contributiva.

A estrutura proposta possibilita a integração do fundo com instrumentos financeiros já existentes, como mecanismos de financiamento climático e políticas de pagamento por serviços ambientais, ampliando o potencial de articulação institucional e de captação de recursos complementares.

Do ponto de vista operacional, a centralização das contribuições em um fundo único facilita a gestão dos recursos, permitindo maior transparência na arrecadação e na distribuição,

bem como o estabelecimento de critérios claros para sua aplicação. Essa organização contribui para a viabilidade institucional do modelo e para sua implementação em escala nacional.

Por fim, a constituição do fundo representa elemento essencial para a operacionalização do sistema de remuneração ambiental, ao viabilizar a conversão das contribuições econômicas em recursos financeiros organizados e disponíveis para a conservação da Floresta Amazônica. Ao estruturar um mecanismo centralizado de arrecadação, o modelo assegura não apenas previsibilidade e transparência na gestão dos recursos, mas também a base necessária para sua posterior distribuição entre as unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia, conforme os critérios estabelecidos no item seguinte.

iii) Distribuição dos recursos entre as unidades federativas com áreas integrantes do bioma Amazônia

A etapa de distribuição dos recursos do fundo de remuneração ambiental constitui o momento em que os valores arrecadados são direcionados às unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia, responsáveis pela manutenção dos serviços ambientais associados à floresta amazônica. Nesse contexto, torna-se necessário definir critérios que permitam estabelecer uma relação consistente entre a provisão desses serviços e a remuneração recebida.

Diante da complexidade inerente à mensuração direta dos serviços ecossistêmicos, propõe-se a utilização da área do bioma Amazônia como *proxy* da provisão desses serviços, por representar um indicador mensurável, disponível e diretamente relacionado à extensão da floresta.

A remuneração atribuída a cada estado pode ser expressa pela seguinte relação:

$$R_j = F \times \frac{A_j}{A_T}$$

Onde:

R_j remuneração do estado com áreas integrantes do bioma Amazônia j

F fundo total de remuneração ambiental

A_j área do bioma Amazônia no estado j

A_T área total do bioma Amazônia no Brasil

Essa formulação estabelece que a distribuição dos recursos ocorre de forma proporcional à participação de cada estado na área total do bioma, assegurando que as unidades federativas com maior participação territorial no bioma Amazônia recebam maior parcela dos recursos. Tal lógica reconhece a relação entre a dimensão territorial do bioma e a capacidade de provisão de serviços ambientais, como regulação climática, manutenção do ciclo hidrológico e armazenamento de carbono.

A adoção da área do bioma como critério de distribuição apresenta vantagens operacionais relevantes, como a simplicidade de aplicação, a disponibilidade de dados oficiais e a transparência na definição dos parâmetros, permitindo a replicação do modelo e a verificação dos resultados.

Entretanto, reconhece-se que a utilização exclusiva da área territorial não capta integralmente aspectos qualitativos relacionados ao grau de conservação da floresta ou ao desempenho ambiental das unidades federativas. Nesse sentido, o modelo admite aperfeiçoamentos futuros mediante a incorporação de indicadores complementares, como taxas de desmatamento evitado, estoques de carbono e métricas de conservação, possibilitando a evolução para mecanismos de remuneração baseados em desempenho ambiental.

Por fim, a estrutura de distribuição proposta permite a conversão dos recursos arrecadados em transferências financeiras direcionadas às unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia, estabelecendo um vínculo direto entre a provisão de serviços ambientais e a remuneração recebida. Dessa forma, o modelo contribui para a construção de um sistema mais equitativo e funcional de financiamento da conservação da floresta amazônica.

iv) Formulação matemática consolidada do modelo

A etapa final da metodologia consiste na consolidação das relações matemáticas definidas nas etapas anteriores, integrando a contribuição das unidades federativas, a formação do fundo de remuneração ambiental e a distribuição dos recursos às unidades federativas com áreas integrantes do bioma Amazônia em uma única expressão matemática. Essa consolidação sintetiza a lógica operacional do modelo proposto.

A partir da substituição das equações previamente definidas, obtém-se a seguinte relação:

$$R_j = \left(\alpha \sum_{i=1}^n V_i \right) \times \frac{A_j}{A_T}$$

onde:

R_j representa a remuneração da unidade federativa que possui áreas integrantes do bioma Amazônia j ;

α corresponde ao percentual de contribuição;

V_i representa o Valor Adicionado Bruto do estado i ;

A_j corresponde à área do bioma Amazônia no estado j ;

A_T representa área total do bioma Amazônia;

n corresponde número total de estados contribuintes

Essa formulação evidencia que a remuneração destinada às unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia resulta da combinação entre dois fatores fundamentais: a capacidade econômica agregada dos estados contribuintes e a participação relativa de cada unidade federativa na área total do bioma Amazônia.

Do ponto de vista analítico, o modelo estabelece uma relação direta entre a geração de riqueza pelos estados contribuintes e a provisão de serviços ambientais, promovendo a internalização de externalidades ambientais positivas associadas à conservação da floresta. Ao vincular o financiamento à atividade econômica, o sistema distribui os encargos de forma proporcional à capacidade contributiva, ao mesmo tempo em que direciona os recursos conforme a relevância ecológica das unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia.

Sob o aspecto operacional, a estrutura matemática proposta apresenta elevada simplicidade operacional, permitindo sua aplicação com base em dados oficiais amplamente disponíveis. Essa característica favorece a transparência do modelo, bem como sua replicabilidade e potencial utilização como instrumento de apoio à formulação de políticas públicas.

A formulação consolidada possibilita a realização de simulações e análises comparativas, permitindo a avaliação dos impactos decorrentes de diferentes valores do parâmetro α . Dessa forma, o modelo pode ser ajustado e calibrado conforme os objetivos do sistema de remuneração ambiental e as condições econômicas do país.

Por fim, a expressão matemática consolidada sintetiza a lógica central do modelo proposto, integrando, em uma única formulação, a capacidade econômica dos estados contribuintes e a participação territorial das unidades federativas que possuem áreas integrantes

do bioma Amazônia. Dessa forma, estabelece-se uma estrutura operacional capaz de converter a arrecadação das contribuições financeiras em um mecanismo objetivo de remuneração pelos serviços ambientais prestados pela floresta amazônica.

c) Aplicação do modelo de remuneração com base em dados empíricos

Diante da estrutura metodológica desenvolvida, procede-se à aplicação do modelo proposto com base em dados empíricos, com o objetivo de demonstrar sua operacionalização no contexto federativo brasileiro e avaliar seus efeitos distributivos.

Para tanto, são utilizados dados econômicos e territoriais provenientes de fontes oficiais, especialmente das Contas Regionais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que permitem mensurar a capacidade econômica das unidades federativas e sua participação relativa na área do bioma Amazônia.

A aplicação do modelo inicia-se com a estimativa da contribuição financeira dos estados brasileiros que não possuem áreas integrantes do bioma Amazônia, calculada com base no Valor Adicionado Bruto (VAB), conforme definido nos itens anteriores. Na sequência, procede-se à formação do fundo de remuneração ambiental, a partir da agregação dessas contribuições, cujos recursos são distribuídos às unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia, de forma proporcional à sua participação territorial no bioma. A simulação dos fluxos financeiros é realizada com base na formulação matemática consolidada do modelo, permitindo demonstrar sua operacionalização por meio dos dados empíricos selecionados.

A partir dessa estrutura, apresentam-se, a seguir, os resultados da aplicação do modelo, evidenciando as contribuições estimadas, a formação do fundo de remuneração ambiental e a distribuição dos recursos entre as unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia.

i) Base de dados utilizada na simulação

A operacionalização do modelo requer a definição das variáveis utilizadas, bem como a identificação das fontes de dados e dos períodos de referência. A Tabela 1 apresenta o conjunto de informações empregadas na simulação, incluindo os indicadores econômicos e territoriais considerados.

Tabela 1 – Informações utilizadas na simulação e fontes dos dados

Informação utilizada	Descrição	Fonte	Ano
Valor Adicionado Bruto estadual a preços correntes	Indicador econômico utilizado para estimar a contribuição financeira dos estados	IBGE – Contas Regionais do Brasil	2023
Área do bioma Amazônia por estado	Extensão territorial utilizada para estimar a distribuição dos recursos	IBGE – Biomas do Brasil	2019
Área total do bioma Amazônia	Base territorial do modelo matemático	IBGE – Biomas do Brasil	2019
Estados brasileiros	Unidades federativas consideradas contribuintes	IBGE – Divisão Territorial do Brasil	2023
Unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia	Unidades federativas com área integrante do bioma Amazônia	IBGE – Biomas do Brasil	2019

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do IBGE.

A sistematização das variáveis evidencia que o modelo se baseia exclusivamente em dados oficiais, amplamente disponíveis e metodologicamente consolidados. A utilização do Valor Adicionado Bruto estadual como indicador econômico permite mensurar a capacidade contributiva das unidades federativas de forma consistente com a estrutura produtiva regional, enquanto as informações territoriais associadas ao bioma Amazônia possibilitam a definição de critérios objetivos para a distribuição dos recursos.

A adoção de bases de dados públicas confere transparência ao modelo e assegura sua replicabilidade, permitindo que os resultados possam ser reproduzidos e ajustados em diferentes contextos. Essa característica reforça a viabilidade operacional da proposta e sua adequação à formulação de políticas públicas.

ii) Estimativa da contribuição das unidades federativas

Com base nos indicadores econômicos apresentados, procede-se à estimativa da contribuição financeira das unidades federativas consideradas contribuintes pelo modelo. Para essa estimativa, aplica-se o parâmetro α , fixado nesta simulação em 0,5%, sobre o Valor Adicionado Bruto (VAB) estadual de cada unidade federativa que não possui áreas integrantes do bioma Amazônia. As unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia não realizam contribuições ao fundo, razão pela qual seus valores de contribuição são apresentados como iguais a zero.

A Tabela 2 apresenta o Valor Adicionado Bruto (VAB) estadual a preços correntes referente ao ano de 2023, identifica as unidades federativas consideradas contribuintes pelo

modelo e demonstra a estimativa das respectivas contribuições financeiras, calculadas mediante a aplicação do percentual de 0,5% sobre o VAB.

Tabela 2 – Estimativa de contribuição financeira por estado com base no Valor Adicionado Bruto (VAB)

Unidade federativa	VAB (R\$ bilhões)	Contribuição estimada (R\$ bilhões)
São Paulo	2.943,73	14,72
Rio de Janeiro	1.049,55	5,25
Minas Gerais	857,72	4,29
Paraná	591,71	2,96
Rio Grande do Sul	570,41	2,85
Santa Catarina	428,29	2,14
Bahia	381,16	1,91
Distrito Federal	325,09	1,63
Goiás	302,33	1,51
Pernambuco	233,52	1,17
Ceará	204,77	1,02
Espírito Santo	174,69	0,87
Mato Grosso do Sul	161,37	0,81
Rio Grande do Norte	90,46	0,45
Paraíba	86,79	0,43
Alagoas	80,14	0,40
Piauí	73,02	0,37
Sergipe	53,71	0,27
Total	-	-
		43,04

Fonte: Elaborado pelo autor com base nas Contas Regionais do Brasil – IBGE (2023).

A distribuição das contribuições evidencia elevada concentração da capacidade econômica nacional em um número reduzido de unidades federativas, com destaque para São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, que, em conjunto, respondem por mais da metade do montante arrecadado. Essa configuração confirma a adequação do critério de capacidade contributiva adotado pelo modelo, ao vincular o financiamento da conservação à geração de riqueza das unidades federativas consideradas contribuintes, evitando a imposição de encargos desproporcionais às unidades federativas com menor dinamismo econômico.

Do ponto de vista distributivo, observa-se que a estrutura proposta promove a internalização das externalidades ambientais positivas associadas à conservação da floresta amazônica, transferindo parte dos custos às unidades federativas que não possuem áreas integrantes do bioma Amazônia, as quais se beneficiam indiretamente dos serviços ecossistêmicos por ela prestados. Ao mesmo tempo, o modelo preserva a proporcionalidade das contribuições, reduzindo riscos de regressividade fiscal e ampliando sua aceitabilidade política.

Adicionalmente, o montante estimado do fundo, da ordem de R\$ 43,04 bilhões anuais, evidencia que a aplicação de um percentual relativamente reduzido sobre a base econômica nacional das unidades federativas contribuintes é suficiente para gerar volume expressivo de recursos. Esse resultado indica que a limitação do financiamento da conservação não decorre da inexistência de capacidade econômica, mas da ausência de mecanismos institucionais capazes de estruturar a redistribuição desses recursos.

iii) Distribuição territorial do bioma Amazônia

A etapa seguinte da aplicação do modelo envolve a identificação da participação relativa das unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia na área total do bioma, variável fundamental para a definição dos critérios de distribuição dos recursos.

A Tabela 3 apresenta a área do bioma Amazônia em cada unidade federativa e sua participação percentual em relação à área total do bioma, parâmetro utilizado para estimar a distribuição proporcional dos recursos do fundo de remuneração ambiental.

Tabela 3 – Área do bioma Amazônia e participação territorial das unidades federativas

Unidade Federativa	Área (km ²)	Participação (%)
Amazonas	1.559.168	37,01
Pará	1.237.085	29,37
Mato Grosso	511.695	12,15
Rondônia	235.212	5,58
Roraima	224.274	5,32
Acre	164.124	3,90
Amapá	142.471	3,38
Maranhão	114.047	2,71
Tocantins	24.666	0,59
Total	4.212.742	100%

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do IBGE (2019).

A distribuição territorial do bioma Amazônia revela forte concentração espacial da responsabilidade pela conservação ambiental, com destaque para as unidades federativas do Amazonas e do Pará, que, juntas, representam a maior parcela da área total do bioma. Essa configuração evidencia que os custos diretos associados à preservação da floresta — incluindo restrições ao uso econômico do solo e pressões sobre políticas públicas locais — não estão uniformemente distribuídos entre as unidades federativas.

Essa assimetria territorial reforça a necessidade de adoção de mecanismos compensatórios capazes de reconhecer a contribuição diferenciada das unidades federativas que

possuem áreas integrantes do bioma Amazônia para a manutenção dos serviços ambientais. Nesse contexto, a utilização da área do bioma como critério de distribuição dos recursos mostra-se adequada, pois permite associar a alocação financeira à dimensão espacial da responsabilidade ambiental.

A heterogeneidade observada entre as unidades federativas evidencia que a conservação da Amazônia não constitui um desafio homogêneo, mas sim um problema territorialmente diferenciado, o que exige instrumentos capazes de refletir essas especificidades na definição dos fluxos financeiros.

iv) Estimativa da distribuição dos recursos

A partir da definição da participação territorial, procede-se à estimativa dos valores a serem destinados às unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia com base na proporção da área do bioma presente em cada uma delas. É de se ressaltar que o ineditismo desta pesquisa baseia-se em analisar a possibilidade e a viabilidade da contribuição e da distribuição dos recursos, mas não se objetiva, nesta pesquisa, tratar de como esses recursos (pagos pelos estados não amazônicos) serão aplicados por cada um dos estados amazônicos.

Com base nesse critério, a Tabela 4 apresenta a estimativa da distribuição dos recursos entre as unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia, proporcionalmente à participação territorial de cada uma no bioma.

Tabela 4 – Estimativa de distribuição dos recursos

Unidade Federativa	Participação (%)	Valor estimado (R\$ milhões)
Amazonas	37,01	15930,28
Pará	29,37	12639,50
Mato Grosso	12,15	5228,07
Rondônia	5,58	2403,20
Roraima	5,32	2291,44
Acre	3,90	1676,88
Amapá	3,38	1455,65
Maranhão	2,71	1165,24
Tocantins	0,59	252,02
TOTAL	100,00	43042,28

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados do IBGE (2019).

A distribuição dos recursos evidencia correspondência direta entre a extensão territorial do bioma e os valores destinados a cada unidade federativa, confirmando a consistência interna do modelo proposto. Observa-se que a unidade federativa do Amazonas, com 37,01% da área

do bioma, concentra o maior volume de recursos, da ordem de R\$ 15,93 bilhões, seguida pela unidade federativa do Pará, com aproximadamente R\$ 12,64 bilhões, evidenciando a centralidade dessas unidades federativas na provisão de serviços ambientais em escala nacional.

Em posição intermediária, destacam-se as unidades federativas de Mato Grosso e Rondônia, que recebem aproximadamente R\$ 5,23 bilhões e R\$ 2,40 bilhões, respectivamente, refletindo sua participação relevante, ainda que menos expressiva, na composição territorial do bioma. Por outro lado, unidades federativas com menor participação, como Tocantins e Maranhão, recebem aproximadamente R\$ 252 milhões e R\$ 1,17 bilhão, respectivamente, o que demonstra a proporcionalidade do modelo em relação à dimensão espacial da conservação.

Do ponto de vista analítico, essa estrutura distributiva corrige parcialmente a assimetria entre os benefícios difusos gerados pela floresta amazônica e os custos concentrados nas unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia. Ao vincular a alocação de recursos à relevância ecológica, o modelo promove uma redistribuição mais equitativa, aproximando-se de uma lógica compatível com os princípios da justiça ambiental e da eficiência econômica.

A aplicação empírica do modelo demonstra sua viabilidade operacional, evidenciando que sua implementação pode ser realizada com base em dados públicos e amplamente disponíveis. A utilização de indicadores econômicos e territoriais permite estruturar um sistema de financiamento contínuo, fundamentado em critérios objetivos e mensuráveis.

Os resultados obtidos indicam que o modelo possui potencial para promover uma redistribuição mais equilibrada dos encargos associados à conservação da floresta amazônica, ao articular a capacidade econômica das unidades federativas com sua relevância territorial no bioma. Dessa forma, a proposta contribui para a construção de um arranjo mais equitativo, alinhado à lógica da economia ambiental e aos princípios distributivos do direito ambiental.

Cabe ressaltar que a adoção da área do bioma como critério principal de distribuição dos recursos, embora adequada do ponto de vista territorial, não incorpora outros fatores relevantes para a conservação, como níveis de desmatamento, pressão antrópica ou efetividade das políticas ambientais das unidades federativas. Dessa forma, o modelo proposto pode não diferenciar, em sua forma atual, unidades federativas que apresentam maior esforço de conservação daquelas que enfrentam maiores desafios de governança ambiental. Essa limitação decorre da delimitação metodológica da presente pesquisa. O objetivo deste estudo não consiste em estabelecer critérios para a aplicação específica dos recursos financeiros, mas em propor um modelo de remuneração pelos serviços ambientais prestados pela floresta amazônica às unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia. Para esse fim, adotou-

se a extensão territorial do bioma como critério de distribuição dos recursos, por ser compatível com os objetivos da pesquisa e suficiente para demonstrar a operacionalização do modelo proposto. Embora outros critérios possam ser adotados em estudos futuros, a presente proposta limita-se ao critério territorial, sem prejuízo de que pesquisas *a posteriori* possam adotar critérios distintos de distribuição ou incorporar variáveis adicionais capazes de aperfeiçoar o modelo para evidenciar a eficácia da aplicação dos recursos.

Outra limitação refere-se à definição do parâmetro de contribuição (α), cuja fixação, embora fundamentada em critérios de viabilidade econômica, permanece dependente de decisões normativas e institucionais. A ausência de um critério universal para sua determinação pode influenciar significativamente os resultados do modelo, exigindo a realização de análises complementares para sua calibragem em diferentes cenários.

Por fim, destaca-se que a implementação do modelo pressupõe a existência de arranjos institucionais e mecanismos de governança capazes de assegurar a arrecadação, a gestão e a distribuição dos recursos, o que envolve desafios jurídicos, políticos e administrativos que extrapolam a dimensão estritamente econômica da proposta. Nesse contexto, a efetividade do modelo dependerá não apenas de sua consistência teórica, mas também de sua capacidade de integração com o sistema federativo e com as políticas públicas ambientais existentes.

A análise desenvolvida ao longo deste capítulo permitiu demonstrar que a valoração econômica dos serviços ambientais, embora essencial para evidenciar a relevância da floresta amazônica, não é suficiente, por si só, para assegurar sua conservação. A existência de externalidades ambientais e a concentração dos custos da preservação em determinadas unidades federativas evidenciam a necessidade de mecanismos institucionais capazes de promover a redistribuição dos encargos ambientais.

Nesse contexto, a proposta de um modelo de remuneração baseado na capacidade econômica das unidades federativas e na dimensão territorial do bioma Amazônia apresenta-se como uma alternativa viável para a estruturação de um sistema contínuo de financiamento da conservação. A aplicação empírica do modelo demonstrou sua operacionalidade, evidenciando que a utilização de dados públicos e amplamente disponíveis permite a construção de um mecanismo transparente, replicável e compatível com a realidade federativa brasileira.

Portanto, os resultados obtidos indicam que a adoção de critérios combinados, econômicos e ecológicos, possibilita a construção de um arranjo mais equitativo, capaz de refletir tanto a geração de riqueza quanto a responsabilidade ambiental dos entes federativos. Essa abordagem contribui para a superação de modelos fragmentados de financiamento, ao propor uma estrutura integrada de compensação pelos serviços ambientais.

Dessa forma, o modelo proposto não apenas reforça a importância da Amazônia no contexto da sustentabilidade ambiental de todo o país, mas também oferece um instrumento concreto para a formulação de políticas públicas voltadas à valorização dos serviços ecossistêmicos, à redução das desigualdades regionais e ao fortalecimento da governança ambiental no Brasil.

CONCLUSÃO

A problemática que instigou esta pesquisa consistiu em verificar a possibilidade de construção de um modelo de remuneração financeira pelos serviços ambientais prestados pela floresta amazônica, considerando que os benefícios ambientais produzidos pelo bioma são usufruídos em escala nacional, enquanto os custos relacionados à conservação permanecem concentrados, sobretudo, nas unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia. A partir dessa problemática, buscou-se analisar a relevância ecológica da floresta amazônica e a necessidade de mecanismos capazes de promover maior equilíbrio na distribuição dos encargos ambientais entre as unidades federativas brasileiras.

Os objetivos da pesquisa foram cumpridos à medida que se analisou a composição e a importância ambiental do bioma amazônico, especialmente sua contribuição para a regulação climática, a manutenção do ciclo hidrológico, a conservação da biodiversidade e a estabilidade ecológica. A pesquisa também permitiu examinar os impactos decorrentes do desmatamento e da degradação ambiental, demonstrando que a redução da cobertura florestal compromete serviços ambientais essenciais, amplia riscos climáticos e afeta o equilíbrio ambiental em escala regional e nacional.

A investigação possibilitou compreender a relação entre sustentabilidade ambiental, externalidades ambientais e instrumentos econômicos voltados à conservação da floresta. Nesse contexto, verificou-se que os benefícios ambientais gerados pela Amazônia extrapolam os limites territoriais da região amazônica e alcançam diferentes unidades federativas brasileiras, sem que exista adequada compensação econômica pelos custos associados à preservação ambiental. Observou-se, ainda, que mecanismos como o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), os fundos climáticos e os instrumentos de REDD+ representam iniciativas relevantes para a promoção da conservação ambiental, embora ainda apresentem limitações relacionadas à escala de atuação, ao financiamento e à implementação institucional.

Os resultados obtidos demonstraram que a floresta amazônica desempenha funções ambientais essenciais para a estabilidade climática, hidrológica e ecológica, produzindo benefícios ambientais de interesse coletivo e nacional. Contudo, constatou-se que os custos relacionados à manutenção da floresta em pé permanecem territorialmente concentrados nas unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia, evidenciando uma assimetria entre os benefícios ambientais compartilhados e os encargos ambientais suportados regionalmente. Essa realidade reforça a existência de externalidades ambientais positivas que não são adequadamente internalizadas pelos mecanismos econômicos tradicionais.

Diante dessas constatações, conclui-se que a construção de mecanismos de remuneração pelos serviços ambientais prestados pela floresta amazônica apresenta relevância ambiental, econômica e federativa. Nesse sentido, a proposta desenvolvida nesta pesquisa buscou contribuir para o debate acerca da necessidade de internalização das externalidades ambientais positivas associadas à conservação da Amazônia, utilizando a capacidade econômica das unidades federativas como fundamento para a compensação financeira voltada à manutenção da floresta em pé.

Por fim, compreende-se que a conservação da floresta amazônica não deve ser tratada como responsabilidade exclusiva das unidades federativas que possuem áreas integrantes do bioma Amazônia, mas como uma questão de interesse nacional, diante da amplitude dos benefícios ambientais proporcionados pela floresta. Assim, espera-se que esta pesquisa contribua para o aprofundamento das discussões relacionadas à remuneração pelos serviços ambientais, à cooperação federativa e à construção de mecanismos voltados à valorização econômica da conservação ambiental no contexto amazônico.

REFERENCIAS

ACOSTA, Alberto. **O bem viver: uma oportunidade para imaginar outros mundos.**

Tradução de Tadeu Breda. São Paulo: Autonomia Literária; Elefante, 2016. Disponível em: <https://rosalux.org.br/wp-content/uploads/2017/06/Bemviver.pdf>. Acesso em: 13 maio 2026.

AMAZONAS, Maurício de Carvalho. Valor ambiental em uma perspectiva heterodoxa institucional-ecológica. **Economia e Sociedade**, Campinas, v. 18, n. 1 (35), p. 183-212, 2009.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ecos/a/7H7J8w8V7kM8s4Qk5Qn7wFn/?format=pdf>. Acesso em: 15 maio 2026.

ANGELSEN, Arild; BROCKHAUS, Maria; SUNDERLIN, William D.; VERCHOT, Louis V. (org.). **Analysing REDD+: Challenges and choices.** Bogor: CIFOR, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.17528/cifor/002601>. Disponível em:

https://www.cifor.org/publications/pdf_files/Books/BAngelsen0902.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.

ARAGÃO, Luiz E. O. C.; ANDERSON, Liana O.; FONSECA, Marcia G.; ROSAN, Thiago M.; VEDOVATO, Luiz B.; WAGNER, Fabiano H. et al. 21st century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, Londres, v. 9, n. 536, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02771-y.pdf>. Acesso em: 15 maio 2026.

ARANTES, Evandro Borges. O direito ambiental contemporâneo e a superação da perspectiva antropocêntrica. **Revista ESMAT**, Palmas, v. 3, n. 2, p. 261-293, 2011. DOI: <https://doi.org/10.34060/reesmat.v3i3.105>. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/333769255_O_DIREITO_AMBIENTAL_CONTEMPORANEO_E_A_SUPERACAO_DA_PERSPECTIVA_ANTROPOCENTRICA/fulltext/696dc4c85cc49c35ce7fe5ac/O-DIREITO-AMBIENTAL-CONTEMPORANEO-E-A-SUPERACAO-DA-PERSPECTIVA-ANTROPOCENTRICA.pdf. Acesso em: 13 maio 2026.

ARTAXO, Paulo. Working together for Amazonia. **Science**, Washington, DC, v. 363, n. 6425, p. 323, 2019. DOI: [10.1126/science.aaw6986](https://doi.org/10.1126/science.aaw6986).

ARTAXO, Paulo; HANSSON, Hans Christen; MACHADO, Luiz Augusto T.; RIZZO, Luciana V. Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth. **PLOS Climate**, San Francisco, v. 1, n. 8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000054>.

BARBIER, Edward B. The concept of natural capital economics. **Land Economics**, Madison, v. 95, n. 1, p. 14-36, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3368/le.95.1.14>. Disponível em: <https://meridian.allenpress.com/landeconomics/article/95/1/14/430801/The-Concept-of-Natural-Capital-Economics>. Acesso em: 15 maio 2026.

BARBIER, Edward B. The concept of natural capital. **Oxford Review of Economic Policy**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 14-36, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxrep/gry028>. Disponível em: <https://academic.oup.com/oxrep/article/35/1/14/5239860>. Acesso em: 15 maio 2026.

BARLOW, Jos; LENNOX, Gareth D.; FERREIRA, Joice; BERENGUER, Erika; LEES, Alexander C.; MAC NALLY, Ralph; FERRAZ, Silvio Frosini de Barros; LOUZADA, Julio; OLIVEIRA, Victor Hugo Fonseca; PARRY, Luke; SOLAR, Ricardo Ribeiro de Castro; VIEIRA, Ima C. G.; ARAGÃO, Luiz E. O. C.; BEGOTTI, Rodrigo Anzolin; BRAGA, Rodrigo F.; CARDOSO, Thiago Moreira; OLIVEIRA JR., Raimundo Cosme de; SOUZA JR., Carlos M.; MOURA, Nárgila G.; NUNES, Sâmia Serra; SIQUEIRA, João Victor; PARDINI, Renata; SILVEIRA, Juliana M.; VAZ-DE-MELLO, Fernando Z.; VEIGA, Ruan Carlo Stulpen; VENTURIERI, Adriano; GARDNER, Toby A.. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. **Nature**, Londres, v. 535, n. 7610, p. 144-147, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature18326>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature18326>. Acesso em: 15 maio 2026.

BAUMOL, William J. On tax and the control of externalities. **The American Economic Review**, Nashville, v. 62, n. 3, p. 307-322, 1972. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1803378>. Acesso em: 15 maio 2026.

BERTA, Nathalie; JULIEN, Pierre; LEVREL, Harold. Economists and the environment since the 1950s: A history of contemporary environmental economics. **History of Political Economy**, Durham, v. 52, n. S1, p. 81-120, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1215/00182702-8715081>. Disponível em: <https://read.dukeupress.edu/hope/article/52/S1/81/168150/Economists-and-the-Environment-since-the-1950s>. Acesso em: 15 maio 2026.

BIELUCZYK, Wanderlei; DUARTE, Marina Pires; CAMARGO, Plínio Barbosa de; NORONHA, Norberto Cornejo; PICCOLO, Marisa de Cassia; TSAI, Siu Mui. Restoration of soil health by Amazonian secondary forests is severely eroded by slash-and-burn recurrence. **Catena**, v. 254, 2025, 108925. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108925>.

BNDES. Fundo Amazônia: **Relatório de atividades 2020**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2020. Disponível em: https://www.fundoamazonia.gov.br/export/sites/default/pt/.galleries/documentos/rafa/RAFA_2020_port.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.

BNDES. Fundo Amazônia: **Relatório de atividades 2021**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2021. Disponível em: https://www.fundoamazonia.gov.br/export/sites/default/pt/.galleries/documentos/rafa/RAFA_2021_port.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.

BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade: o que é - o que não é**. 1. ed. Petrópolis: Vozes, 2012.

BOLÍVIA. **Ley n.º 300, de 15 de octubre de 2012. Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien**. La Paz: Asamblea Legislativa Plurinacional, 2012. Disponível em: <https://www.planificacion.gob.bo/uploads/marco-legal/Ley%20N%C2%B0%20071%20DERECHOS%20DE%20LA%20MADRE%20TIERRA.pdf>. Acesso em: 13 maio 2026.

BORNER, Jan; WUNDER, Sven; WERTZ-KANOUNNIKOFF, Sheila; TITO, Mauricio R.; PEREIRA, Luiz; NASSAR, André. Direct conservation payments in the Brazilian Amazon: Scope and equity implications. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 69, n. 6, p. 1272-1282, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.01.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800909005310>. Acesso em: 15 maio 2026.

BOSELTMANN, Klaus. **The principle of sustainability: transforming law and governance**. 2. ed. London: Routledge, 2017. Disponível em: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781317019183_A28997687/preview-9781317019183_A28997687.pdf. Acesso em: 12 maio 2026.

BOULTON, Chris A.; LENTON, Timothy M.; BOERS, Niklas. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. **Nature Climate Change**, Londres, v. 12, p. 271-278, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01287-8>. Acesso em: 10 maio 2026.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 13 maio 2026.

BRASIL. Lei n.º 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA). **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 14 jan. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14119.htm. Acesso em: 15 maio 2026.

BUSCH, Jonah; FERRETTI-GALLON, Kalifi. What drives deforestation and what stops it? A meta-analysis. **Review of Environmental Economics and Policy**, Chicago, v. 11, n. 1, p. 3-23, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/reep/rew013>. Disponível em: <https://academic.oup.com/reep/article/11/1/3/3061098>. Acesso em: 15 maio 2026.

CAPPELLI, Sílvia. In dubio pro natura. **Revista do Ministério Público do RS**, Porto Alegre, n. 89, p. 111-136, jan./jun. 2021. Disponível em: <https://www.revistadomprs.org.br/index.php/amprs/article/view/232>. Acesso em: 15 maio 2026.

CAPRA, Fritjof. **A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. Tradução de Newton Roberval Eichenberg. São Paulo: Cultrix, 1996.

CARDINALE, Bradley J.; DUFFY, J. Emmett; GONZALEZ, Andrew; HOOPER, David U.; PERRINGS, Charles; VENAIL, Patrick; NARWANI, Anita; MACE, Georgina M.; TILMAN, David; WARDLE, David A.; KINZIG, Ann P.; DAILY, Gretchen C.; LOREAU, Michel; GRACE, James B.; LARIGAUDERIE, Anne; SRIVASTAVA, Diane S.; NAEEM, Shahid. Biodiversity loss and its impact on humanity. **Nature**, Londres, v. 486, p. 59-67, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature11148>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature11148>. Acesso em: 15 maio 2026.

CHAPRON, Guillaume; EPSTEIN, Yaffa; LÓPEZ-BAO, José Vicente. A rights revolution for nature. **Science**, Washington, v. 363, n. 6434, p. 1392-1393, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aav5601>. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/363/6434/1392>. Acesso em: 12 maio 2026.

COLÔMBIA. **Constitución Política de Colombia 1991**. Bogotá: Asamblea Nacional Constituyente, 1991. Disponível em: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html. Acesso em: 13 maio 2026.

COLÔMBIA. **Corte Constitucional. Sentencia T-622 de 2016. Reconocimiento del Río Atrato como sujeto de derechos**. Bogotá: Corte Constitucional de Colombia, 2016. Disponível em: <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2016/t-622-16.htm>. Acesso em: 13 maio 2026.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD). **Our Common Future**. Oxford: Oxford University Press, 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em: 14 maio 2026.

COSTA, Francisca Sueli da. Pagamento por serviços ambientais: limites e oportunidades para o desenvolvimento sustentável da Amazônia brasileira. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 11, n. 2, p. 1-18, 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/328>. Acesso em: 15 maio 2026.

COSTA, Marcos Heil; FOLEY, Jonathan A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. **Journal of Climate**, v. 13, n. 1, p. 18–34, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013%3C0018:CEODAD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013%3C0018:CEODAD%3E2.0.CO;2). Acesso em: 8 maio 2026.

COSTA, Marcos Heil; PIRES, Gustavo F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 30, n. 13, p. 1970–1979, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2048>. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2048>. Acesso em: 15 maio 2026.

COSTA, Nicolao Dino de Castro e. **Direito ambiental brasileiro**. Brasília, DF: ESMPU, 2026. Material didático. Disponível em: https://mpmt.mp.br/site/storage/webdisco/arquivos/DIREITO_AMBIENTAL_BRASILEIRO.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.

COSTA, Rosangela Calado da. **Pagamentos por serviços ambientais: limites e oportunidades para o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar na Amazônia Brasileira**. 2008. 246 f. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/90/90131/tde-14042009-113930/publico/Tese_Rita_Costa.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.

COSTANZA, Robert; DE GROOT, Rudolf; BRAAT, Leon; KUBISZEWSKI, Ida; FIORAMONTI, Lorenzo; SUTTON, Paul; FARBER, Steve; GRASSO, Marco. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? **Ecosystem Services**, Amsterdam, v. 28, p. 1-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212041617301329>. Acesso em: 15 maio 2026.

COSTANZA, Robert; D'ARGE, Ralph; DE GROOT, Rudolf; FARBER, Stephen; GRASSO, Monica; HANNON, Bruce; LIMBURG, Karin; NAEEM, Shahid; O'NEILL, Robert V.; PARUELO, Jose; RASKIN, Robert G.; SUTTON, Paul; VAN DEN BELT, Marjan. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 3-15, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921800998000202?via%3Dihub>. Acesso em: 15 maio 2026.

CUNHA, Hellen Fernanda Viana; ANDERSEN, Kelly M.; LUGLI, Laynara Figueiredo; SANTANA, Flavia Delgado; ALEIXO, Izabela; et al. Direct evidence for phosphorus limitation on Amazon forest productivity. **Nature**, Londres, v. 608, p. 558-562, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05085-2>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05085-2>. Acesso em: 15 maio 2026.

DALY, Herman E. **Ecological economics and sustainable development**: selected essays of Herman Daly. Cheltenham: Edward Elgar, 2007. Disponível em: https://library.uniteddiversity.coop/Measuring_Progress_and_Eco_Footprinting/Ecological_Economics_and_Sustainable_Development-Selected_Essays_of_Herman_Daly.pdf. Acesso em: 14 maio 2026.

DALY, Herman. **Economics for a Full World**. Great Transition Initiative, Boston, jun. 2015. Disponível em: <https://greattransition.org/publication/economics-for-a-full-world>. Acesso em: 14 maio 2026.

DAVIDSON, Eric A.; ARAÚJO, Alessandro C. de; ARTAXO, Paulo; BALCH, Jennifer K.; BROWN, I. Foster; BUSTAMANTE, Mercedes M. C.; COE, Michael T.; DEFRIES, Ruth S.; KELLER, Michael; LONGO, Marcos; MUNGER, J. William; SCHROEDER, Wilfrid; SOARES-FILHO, Britaldo S.; SOUZA JUNIOR, Carlos M.; WOFSY, Steven C. The Amazon basin in transition. **Nature**, London, v. 481, n. 7381, p. 321-328, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10717>.

DIEGUES, Antonio Carlos. **O mito moderno da natureza intocada**. 3. ed. São Paulo: Hucitec, 2000. Disponível em: <https://nupaub.fflch.usp.br/sites/nupaub.fflch.usp.br/files/O%20mito%20moderno.compressed.pdf>. Acesso em: 6 maio 2026.

DIRZO, Rodolfo; YOUNG, Hillary S.; GALETTI, Mauro; CEBALLOS, Gerardo; ISAAC, Nick J. B.; COLLEN, Ben. Defaunation in the Anthropocene. **Science**, Washington, v. 345, n. 6195, p. 401-406, 2014. DOI: [10.1126/science.1251817](https://doi.org/10.1126/science.1251817). Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1251817>. Acesso em: 10 maio 2026.

DÍAZ, Sandra; SETTELE, Josef; BRONDÍZIO, Eduardo S.; et al. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. **Science**, Washington, v. 366, n. 6471, p. eaax3100, 2019. DOI: 10.1126/science.aax3100. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337933460_Pervasive_human-driven_decline_of_life_on_Earth_points_to_the_need_for_transformative_change. Acesso em: 10 maio 2026.

ELOY, Ludivine. Pagamentos por serviços ambientais na agricultura familiar: desafios para a sustentabilidade no México. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 2, n. 1, p. 1-15, 2011. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/view/16820>. Acesso em: 15 maio 2026.

ENGEL, Stefanie; PAGIOLA, Stefano; WUNDER, Sven. Designing payments for environmental services in theory and practice: An overview of the issues. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 65, n. 4, p. 663-674, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.03.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800908000993>. Acesso em: 15 maio 2026.

EQUADOR. **Constitución de la República del Ecuador 2008**. Registro Oficial n. 449, de 20 out. 2008. Quito: Asamblea Constituyente, 2008. Disponível em: <https://www.asambleanacional.gob.ec/sites/default/files/constituciondelarepublicadelecuador-incluyereformas-consultapopular7demayo.pdf>. Acesso em: 13 maio 2026.

ESPINOZA, Jhan-Carlo; JIMENEZ, Juan Carlos; MARENGO, José Antonio; SCHONGART, Jochen; RONCHAIL, Josyane; LAVADO-CASIMIRO, Waldo; RIBEIRO, João Vitor M. The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. **Scientific Reports**, v. 14, 2024, art. 8107. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>.

FAO. **The State of the World's Forests 2020: Forests, biodiversity and people**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca8642en>. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca8642en>. Acesso em: 15 maio 2026.

FEARNSIDE, Philip M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates, and consequences. **Conservation Biology**, Boston, v. 19, n. 3, p. 680-688, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00697.x>. Disponível em: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1523-1739.2005.00697.x>. Acesso em: 15 maio 2026.

FEARNSIDE, Philip M. Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: implications for the aluminum industry. **World Development**, Oxford, v. 77, p. 48-65, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.08.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X15002781>. Acesso em: 15 maio 2026.

FEARNSIDE, Philip M. Environmental services as a strategy for sustainable development in rural Amazonia. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 53-70, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.12.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800904003025>. Acesso em: 15 maio 2026.

FEARNSIDE, Philip M. Serviços ambientais como estratégia para o desenvolvimento sustentável na Amazônia rural. **Inclusão Social**, Brasília, v. 4, n. 1, p. 24-44, 2010. Disponível em: <https://revista.ibict.br/inclusao/article/view/1667>. Acesso em: 15 maio 2026.

FEARNSIDE, Philip M.; LEAL FILHO, Walter. COP 30: Brazilian policies must change. **Science**, Washington, v. 387, n. 6740, p. 1237, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.adu9113>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adu9113>. Acesso em: 15 maio 2026.

FLORES, Bernardo M.; STAVER, A. Carla; BOERS, Niklas; et al. Critical transitions in the Amazon forest system. **Nature**, Londres, v. 626, p. 555-564, 2024. DOI: 10.1038/s41586-023-06970-0. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41586-023-06970-0?utm_source. Acesso em: 10 maio 2026.

FORSTER, Piers M.; SMITH, Christopher J.; WALSH, Tim; LAMB, William F.; LEE, Jan Ivar Korsbakken; FRIEDLINGSTEIN, Pierre et al. Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. **Earth System Science Data**, [s. l.], v. 15, p. 2295-2327, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>. Disponível em: https://essd.copernicus.org/articles/15/2295/2023/?utm_source. Acesso em: 11 abr. 2026.

FRARE, Julio Cesar Vieira; MARTINS, Gabriel Caixeta; FREITAS, Ludmila de; OLIVEIRA, Ivanildo Amorim de; RAMOS, Silvio. Bioeconomia na Amazônia: importância da matéria orgânica do solo para a manutenção dos sistemas produtivos. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 2, 2023, e28512240261. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.40261>.

FUNDO AMAZÔNIA. **Orientações para o apoio do Fundo Amazônia à fiscalização e combate a crimes e infrações ambientais pelos estados da Amazônia Legal**. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.fundoamazonia.gov.br/pt/.galleries/documentos/diretrizes_criterios/Criterios_Orientadores_Acoes_fiscalizacao_estados.pdf. Acesso em: 7 mai. 2026.

GATTI, Luciana V.; BASSO, Luana S.; MILLER, John B.; GLOOR, Manuel; DOMINGUES, Lucas Gatti; et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, London, v. 595, n. 7867, p. 388-393, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03629-6>. Acesso em: 15 maio 2026

GIAMMARESE, Adam; BROWN, Jacob; MALIK, Nishant. Reconfiguration of Amazon's connectivity in the climate system. **Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science**, College Park, v. 34, n. 1, 013134, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0165861>. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/chaos/article/34/1/013134/3061541/Reconfiguration-of-Amazon-s-connectivity-in-the>. Acesso em: 15 maio 2026.

GLASER, Bruno; BIRK, Jago Jonas. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio).

Geochimica et Cosmochimica Acta, Oxford, v. 82, p. 39-51, 2012. DOI:

10.1016/j.gca.2010.11.029. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703710006883>. Acesso em: 9 maio 2026.

GUDYNAS, Eduardo. Buen vivir: today's tomorrow. **Development**, Londres, v. 54, n. 4, p. 441-447, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1057/dev.2011.86>. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/263662980_Buen_Vivir_Today's_Tomorrow.

Acesso em: 12 maio 2026.

GUEDES, Fátima Becker; SEEHUSEN, Susan Edda (orgs.). **Pagamentos por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. 2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012. Disponível em:

https://www.mma.gov.br/estruturas/202/_arquivos/psa_na_mata_atlantica_202.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.

HADDAD, Nick M.; BRUDVIG, Lars A.; CLOBERT, Jean; DAVIES, Kendi F.; GONZALEZ, Andrew; HOLT, Robert D.; LOVEJOY, Thomas E.; SEXTON, Joseph O.; AUSTIN, Mike P.; COLLINS, Cathy D.; COOK, William M.; DAMSCHEN, Ellen I.; EWERS, Robert M.; FOSTER, Bryan L.; JENKINS, Clinton N.; KING, Andrew J.; LAURANCE, William F.; LEVEY, Douglas J.; MARGULES, Chris R.; MELBOURNE, Brett A.; NICHOLLS, A. O.; ORROCK, John L.; SONG, Dan-Xia; TOWNSHEND, John R. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. **Science Advances**, Washington, v. 1, n. 2, e1500052, 2015. DOI: 10.1126/sciadv.1500052. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1500052>. Acesso em: 15 maio 2026.

HALLEGATTE, Stéphane; GREEN, Colin; NICHOLLS, Robert J.; CORFEE-MORLOT, Jan. Future flood losses in major coastal cities. **Nature Climate Change**, Londres, v. 3, n. 9, p. 802–806, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nclimate1979>. Acesso em: 11 maio 2026.

HAUER, Mathew E.; HARDY, Dean; KULP, Scott A.; MUELLER, Valerie; WRATHALL, David J.; CLARK, Peter U. Assessing population exposure to coastal flooding due to sea level rise. **Nature Communications**, Londres, v. 12, n. 6900, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27260-1>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-27260-1?> Acesso em: 11 maio 2026.

HECKENBERGER, Michael J.; KUIKURO, Afukaka; KUIKURO, Urissapá Tabata; RUSSELL, J. Christian; SCHMIDT, Morgan; FAUSTO, Carlos; FRANCHETTO, Bruna. Amazonia 1492: pristine forest or cultural parkland? **Science**, Washington, v. 301, n. 5640, p. 1710-1714, 2003. DOI: 10.1126/science.1086112. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1086112>. Acesso em: 10 maio 2026.

HUBAU, Wannes; LEWIS, Simon L.; PHILLIPS, Oliver L. et al. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. **Nature**, Londres, v. 579, p. 80-87, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2035-0>. Acesso em: 9 maio 2026.

HUPFFER, Haide Maria; WEYERMÜLLER, André Rafael; WACLAWOVSKY, William G. Uma análise sistêmica do princípio do protetor-recebedor na institucionalização de programas de compensação por serviços ambientais. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 95-114, jan./jun. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/mSBBYfLyV5nkYxvJ7QhP9WH/>. Acesso em: 15 maio 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250 000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. (Relatórios Metodológicos, v. 45). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contas Regionais do Brasil 2021**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9054-contas-regionais-do-brasil.html>. Acesso em: 15 maio 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Bioma**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/quadrogeografico/pdf/qg_2025_240_bioma.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa industrial anual: empresa 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15 maio 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 15 maio 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 15 maio 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. Geneva: IPCC, 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf. Acesso em: 11 maio 2026.

INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES (IPBES). **Global assessment report on biodiversity and ecosystem services**. Bonn: IPBES Secretariat, 2019. Disponível em: <https://ipbes.net/global-assessment>. Acesso em: 15 maio 2026.

INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES (IPBES). **Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services**. Bonn: IPBES Secretariat, 2019. Disponível em: <https://ipbes.net/global-assessment>. Acesso em: 7 maio 2026.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis – Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.

JOHNSTON, Robert J.; BOYLE, Kevin J.; ADAMOWICZ, Wiktor; BENNETT, Jeff; BROUWER, Roy; CAMERON, Trudy A.; HANEMANN, W. Michael; KEELER, Bonnie; LOOMIS, John; SCARPA, Riccardo; TOURANGEAU, Roger; VOSSLER, Christian A. Contemporary guidance for stated preference studies. **Journal of the Association of Environmental and Resource Economists**, Chicago, v. 4, n. 2, p. 319-405, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1086/691697>. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/691697>. Acesso em: 15 maio 2026.

KAUFFMAN, Craig M. **Rights of nature: institutions, law, and policy for sustainable development**. In: SOWERS, Jeannie; VANDEVEER, Stacy D.; WEINTHAL, Erika (org.). *The Oxford handbook of comparative environmental politics*. Oxford: Oxford University Press, 2021. p. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780197515037.013.19>. Disponível em: <https://academic.oup.com/edited-volume/41271/chapter/350849699>. Acesso em: 13 maio 2026.

KOTZÉ, Louis J.; KIM, Rakhyun E.; BLANCHARD, Catherine; GELLERS, Joshua C.; HOLLEY, Cameron; PETERSMANN, Marie; VAN ASSELT, Harro; BIERMANN, Frank; HURLBERT, Margot. Earth system law: exploring new frontiers in legal science. **Earth System Governance**, [s. l.], v. 11, 100126, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esg.2021.100126>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589811621000306?via%3Dihub>. Acesso em: 13 maio 2026.

KULP, Scott A.; STRAUSS, Benjamin H. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. **Nature Communications**, Londres, v. 10, n. 4844, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12808-z>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-12808-z>. Acesso em: 12 mar. 2026.

KUMINOFF, Nicolai V.; PARMETER, Christopher F.; POPE, Jaren C. Which hedonic models can we trust to recover the marginal willingness to pay for environmental amenities? **Journal of Environmental Economics and Management**, Amsterdam, v. 60, n. 3, p. 145-160, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2010.06.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0095069610000596>. Acesso em: 15 maio 2026.

KUREK, Martin R.; STUBBINS, Aron; DRAKE, Travis W.; MOURA, Jose M. S.; HOLMES, R. Max; OSTERHOLZ, Helena; DITTMAR, Thorsten; PEUCKER-EHRENBRINK, Bernhard; MITSUYA, Miyuki; SPENCER, Robert G. M. Drivers of organic molecular signatures in the Amazon River. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 35, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GB006938>.

LE COQ, Jean François; FROGER, Géraldine; LEGRAND, Thomas; SAENS, Fernando. **Continuity and inflexions of the program of Payment for Environmental Services in Costa Rica: a learning process and stakeholders' balance of power perspective.** **Programme SERENA**, Document de travail n. 2011-10, 2011. Disponível em: http://www.serena-anr.org/IMG/pdf/WP_Serena_2011_10_LeCoq_et_al.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.

LE COQ, Jean-François; FROGER, Géraldine; LEVEQUE, François. Payments for environmental services in Costa Rica: From Rio to hybridization. **Journal of Sustainable Forestry**, Philadelphia, v. 30, n. 8, p. 746-760, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2011.570438>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10549811.2011.570438>. Acesso em: 15 maio 2026.

LEAL FILHO, Walter; DINIS, Maria Alzira Pimenta; CANOVA, Moara Almeida; CATALDI, Marcio; COSTA, Giulia Angelina Silva da; ENRICH-PRAST, Alex; SYMEONAKIS, Elias; BREARLEY, Francis Q. Managing ecosystem services in the Brazilian Amazon: the influence of deforestation and forest degradation in the world's largest rain forest. **Geoscience Lettersscience Letters**, Londres, v. 12, n. 24, 2025. DOI: 10.1186/s40562-025-00391-9. Disponível em: Geoscience Lettersscience Letters. Acesso em: 14 maio 2026.

LEFF, Enrique. Complexidade, interdisciplinaridade e saber ambiental. **Olhar de Professor**, Ponta Grossa, v. 14, n. 2, p. 309-335, 2011. DOI: 10.5212/OlharProfr.v.14i2.0007. Disponível em: <http://www.revistas2.uepg.br/index.php/olhardeprofessor/article/view/3515>. Acesso em: 14 maio 2026.

LEFF, Enrique. **Racionalidade ambiental: a reapropriação social da natureza**. Tradução de Luís Carlos Cabral. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.

LEOPOLD, Aldo. **A sand county almanac and sketches here and there**. New York: New York: Ballantine Books, 1970. Disponível em: https://www.forum-transregionale-studien.de/fileadmin/pdf/zukunftphilologie/lecture-cum-seminar/leopold-a_sand_county_almanac.pdf? Acesso em: 12 maio 2026.

LEVIS, Carolina; COSTA, Flávia R. C.; CLEMENT, Charles R.; NEVES, Eduardo G.; PHILLIPS, Oliver L.; TER STEEGE, Hans et al. Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition. **Science**, Washington, v. 355, n. 6328, p. 925-931, 2017. DOI: 10.1126/science.aal0157. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aal0157>. Acesso em: 9 maio 2026.

LOPES, Cristina L.; MOURÃO, João; CHIAVARI, Joana; GANDOUR, Clarissa.

Conciliação ambiental e desmatamento na Amazônia: implicações e desafios a partir de evidências. Rio de Janeiro: Climate Policy Initiative; WWF-Brasil, 2021. Disponível em: <https://climatepolicyinitiative.org/wp-content/uploads/2021/12/Conciliacao-Ambiental-e-Desmatamento-na-Amazonia.pdf>. Acesso em: 6 mai. 2026.

LOVEJOY, Thomas E.; NOBRE, Carlos. Amazon tipping point. **Science Advances**, v. 4, n. 2, eaat2340, 2018. Disponível em: <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/sciadv.aat2340>. Acesso em: 15 maio 2026.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. **Direito ambiental brasileiro**. 21. ed. São Paulo: Malheiros, 2013.

MACHADO, Paulo Affonso Leme. **Direito ambiental brasileiro**. 22. ed. rev., ampl. e atual. São Paulo: Malheiros, 2014.

MAGANHINI, Thaís Bernardes. Terras indígenas no estado de Rondônia: prioridade no pagamento por serviços ambientais como vetor de desenvolvimento sustentável. **Estudos Ibero-Americanos**, Porto Alegre, v. 48, n. 1, p. 1-10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.15448/1980-864X.2022.1.42455>. Acesso em: 4 maio 2026.

MALHI, Yadvinder; ROBERTS, J. Timmons; BETTS, Richard A.; KILLEEN, Timothy J.; LI, Wenhong; NOBRE, Carlos A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, Washington, v. 319, n. 5860, p. 169-172, 2008. DOI: 10.1126/science.1146961. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1146961>. Acesso em: 9 maio 2026.

MARENGO, Jose A.; SOUZA JR., Carlos M.; THONICKE, Kirsten; BURTON, Chantelle; HALLADAY, Kate; BETTS, Richard A.; ALVES, Lincoln M.; SOARES, Wagner R. Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. **Frontiers in Earth Science**, Lausanne, v. 6, art. 228, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2018.00228/full>. Acesso em: 15 maio 2026.

MARENGO, Jose Antonio. On the hydrological cycle of the Amazon Basin: a historical review and current state-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 21, n. 3a, p. 1-19, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/5n3vQKBwM8HtLhQp9XGKzXx/?lang=en>. Acesso em: 10 maio 2026.

MENDES, Débora Fernandes de Souza. **Arrecadação de multas e a política sancionadora do IBAMA contra o desmatamento ilegal em Rondônia: uma análise a partir da criminologia verde**. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Administração Pública) – Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unir.br/>. Acesso em: 7 mai. 2026.

MILANEZ, Felipe. **Fundamentos de ecologia**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Direito; Superintendência de Educação a Distância, 2020.

MILARÉ, Édís. Direito do ambiente: a gestão ambiental em foco: doutrina, jurisprudência, glossário. 10. ed. rev., atual. e ampl. São Paulo: **Revista dos Tribunais**, 2015.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>. Acesso em: 15 maio 2026.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano Nacional de Promoção das Cadeias de Produtos da Sociobiodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/bioeconomia/acervo-historico/plano-nacional-para-a-promocao-dos-produtos-da-sociobiodiversidade-pnpsb/descricao-pnpsb-julho-09.pdf>. Acesso em: 10 maio 2026.

MORIN, Edgar; KERN, Anne-Brigitte. **Terra-pátria**. Tradução de Paulo Azevedo Neves da Silva. Porto Alegre: Sulina, 2003.

MUÑOZ-PIÑA, Carlos; GUEVARA, Alejandro; TORRES, Juan Manuel; BRAÑA, Josefina. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 65, n. 4, p. 725-736, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800907005505>. Acesso em: 15 maio 2026.

NAESS, Arne. The shallow and the deep, long-range ecology movement: a summary. **Inquiry**, Oslo, v. 16, n. 1-4, p. 95-100, 1973. DOI: <https://doi.org/10.1080/00201747308601682>. Disponível em: https://openairphilosophy.org/wp-content/uploads/2018/11/OAP_Naess_Shallow_and_the_Deep.pdf?. Acesso em: 12 maio 2026.

NASCIMENTO FERREIRA, Marie Joan; POZZETTI, Valmir César. A contribuição do princípio da felicidade para a construção de cidades inteligentes. **Revista de Direito Urbanístico**, Cidade e Alteridade, Brasília, v. 7, n. 1, p. 1-19, jan./jul. 2021. Disponível em: <https://indexlaw.org/index.php/revistarduca/article/view/7665>. Acesso em: 20 abr. 2026.

NEWBOLD, Tim et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. **Nature**, Londres, v. 520, n. 7545, p. 45-50, 2015. DOI: 10.1038/nature14324. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature14324>. Acesso em: 15 maio 2026.

NOBRE, Antonio Donato. **O futuro climático da Amazônia**: relatório de avaliação científica. São José dos Campos, SP: ARA; CCST-INPE; INPA, 2014. Disponível em: <https://www.ccst.inpe.br/wp-content/uploads/2014/11/Futuro-Climatico-da-Amazonia.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025.

NOBRE, Carlos A.; BORMA, Luciana de Souza. Tipping points for the Amazon forest. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Amsterdã, v. 1, n. 1, p. 28-36, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.07.003>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.07.003>. Acesso em: 15 maio 2026.

NOBRE, Carlos A.; SAMPAIO, Gilvan; BORMA, Laura S.; CASTILLA-RUBIO, Juan Carlos; SILVA, José S.; CARDOSO, Manoel. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, Washington, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016. DOI: 10.1073/pnas.1605516113. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1605516113>. Acesso em: 14 maio 2026.

NOBRE, Carlos A.; SAMPAIO, Gilvan; SALAZAR, Luis. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 59, n. 3, p. 22–27, 2007. Disponível em: <https://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v59n3/a12v59n3.pdf>. Acesso em: 09 maio 2026.

ODUM, Eugene P. **Fundamentos de ecologia**. 4. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Public goods and externalities: agri-environmental policy measures in selected OECD countries**. Paris: OECD Publishing, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/9789264239821-en>. Acesso em: 4 maio 2026..

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Biodiversity, Natural Capital and the Economy: A Policy Guide for Finance, Economic and Environment Ministers**. Paris: OECD Publishing, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1787/1a1ae114-en>. Disponível em: <https://www.oecd.org/environment/biodiversity-natural-capital-and-the-economy-1a1ae114-en.htm>. Acesso em: 15 maio 2026.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Scaling Up Climate Finance in Developing Countries**. Paris: OECD Publishing, 2022. Disponível em: <https://www.oecd.org/climate-change/finance-usd-100-billion-goal/>. Acesso em: 15 maio 2026.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Recommendation of the Council on Guiding Principles concerning International Economic Aspects of Environmental Policies**. Paris: OECD, 1972. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/the-polluter-pays-principle_9789264044845-en.html. Acesso em: 15 maio 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment**. Stockholm, 1972. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>. Acesso em: 14 maio 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento. Rio de Janeiro, 1992. In: SENADO FEDERAL. Debates Parlamentares: 25 anos da Rio-92. Brasília, DF, 2017. Disponível em: https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/589791/001107013_Debates_25_anos_Rio_92.pdf?. Acesso em: 15 maio 2026.

PAGIOLA, Stefano. Payments for environmental services in Costa Rica. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 65, n. 4, p. 712-724, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.07.033>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800907005529>. Acesso em: 15 maio 2026.

PAINEL CIENTÍFICO PARA A AMAZÔNIA (PCA). Relatório de Avaliação da Amazônia 2025: conectividade da Amazônia para um planeta vivo. Nova York: **Sustainable Development Solutions Network** (SDSN), 2025. Disponível em: Painel Científico para a Amazônia – Relatório de Avaliação da Amazônia 2025. Acesso em: 12 maio 2026.

PARSONS, George R. **Travel cost models**. In: CHAMP, Patricia A.; BOYLE, Kevin J.; BROWN, Thomas C. (org.). *A Primer on Nonmarket Valuation*. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2017. p. 187-233. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7104-8_8. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-7104-8_8. Acesso em: 15 maio 2026.

PERES, Carlos Augusto; GARDNER, Toby Alan; BARLOW, Jos; ZUANON, Jansen; MICHALSKI, Fernanda; LEES, Alexander C.; VIEIRA, Igor C. G.; MOREIRA, Fernando M. S.; FEELEY, Kenneth J. Biodiversity conservation in human-modified Amazonian forest landscapes. **Biological Conservation**, Essex, v. 143, n. 10, p. 2314-2327, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.01.021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320710000377>. Acesso em: 15 maio 2026.

PERKINS-KIRKPATRICK, Sarah E.; LEWIS, Sophie C. Increasing trends in regional heatwaves. **Nature Communications**, Londres, v. 11, n. 3357, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-16970-7>. Acesso em: 10 maio 2026.

PIGOU, Arthur Cecil. **The Economics of Welfare**. London: Macmillan, 1920.

POZZETTI, Valmir César e CARVALHO, Victor Matheus Silva. A contabilidade ambiental como uma ferramenta eficaz à sustentabilidade. **Revista Derecho Y Cambio Social**. n° 56, ABR-JUN 2019. Disponível em: https://scholar.google.com.br/citations?view_op=view_citation&hl=pt-

POZZETTI, Valmir César; NASCIMENTO, Leonardo Leite. Direitos da natureza: o rio Amazonas comanda a vida. **Revista Jurídica**, Curitiba, v. 3, n. 56, p. 445-474, 2019. DOI: 10.6084/m9.figshare.9795209. Disponível em: <https://revista.unicuritiba.edu.br/index.php/RevJur/article/view/3637>. Acesso em: 13 maio 2026.

QUESADA, Carlos A.; LLOYD, Jon; SCHWARZ, Michael; PATIÑO, Sandra; BAKER, Tim R.; CZIMCZIK, Claudia; FILLEY, Timothy; MARTINELLI, Luiz A. et al. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, Göttingen, v. 7, p. 1515–1541, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-7-1515-2010>. Disponível em: <https://bg.copernicus.org/articles/7/1515/2010/bg-7-1515-2010.pdf>. Acesso em: 15 maio 2026.

RAISG – Rede Amazônica de Informação Socioambiental Georreferenciada. **Amazônia sob pressão 2020**. São Paulo: ISA, 2021. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/acervo/livros/amazonia-sob-pressao-2020?>. Acesso em: 27 abr. 2026.

RAJÃO, Raoni; NOBRE, Antonio Donato; CUNHA, Evandro Landulfo Teixeira Paradela; DUARTE, Tiago Ribeiro; MARCOLINO, Camilla; SOARES-FILHO, Britaldo; SPAROVEK, Gerd; RODRIGUES, Ricardo R.; VALERA, Carlos; BUSTAMANTE, Mercedes Maria da Cunha; NOBRE, Carlos; LIMA, Letícia Santos de. The risk of fake controversies for Brazilian environmental policies. **Biological Conservation**, Amsterdam, v. 266, art. 109447, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109447>.

RAJÃO, Raoni; SOARES-FILHO, Britaldo; NUNES, Felipe; BÖRNER, Jan; MACHADO, Lilian; ASSIS, Débora; OLIVEIRA, Amanda; PINTO, Luis; RIBEIRO, Vivian; RAUSCH, Lisa; GIBBS, Holly; FIGUEIRA, Danilo. The rotten apples of Brazil's agribusiness: Brazil's inability to tackle illegal deforestation puts the future of its agribusiness at risk. **Science**, Washington, DC, v. 369, n. 6501, p. 246-248, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba6646>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aba6646>. Acesso em: 15 maio 2026.

RICHARDSON, Katherine; STEFFEN, Will; LUCHT, Wolfgang; BENDTSEN, Jørgen; CORNELL, Sarah E.; DONGES, Jonathan F.; FETZER, Ingo; BALA, Govindasamy; BLOH, Werner von; FEULNER, Georg et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, Washington, v. 9, n. 37, eadh2458, 2023. DOI: 10.1126/sciadv.adh2458. Disponível em: <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/sciadv.adh2458>. Acesso em: 14 maio 2026.

ROCKSTRÖM, Johan; STEFFEN, Will; NOONE, Kevin et al. A safe operating space for humanity. **Nature**, London, v. 461, p. 472–475, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1038/461472a>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/461472a>. Acesso em: 14 maio 2026.

ROCKSTRÖM, Johan; STEFFEN, Will; NOONE, Kevin; PERSSON, Åsa; CHAPIN III, F. Stuart; LAMBIN, Eric F.; LENTON, Timothy M.; SCHEFFER, Marten; FOLKE, Carl; SCHELLNHUBER, Hans Joachim et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, Wolfville, v. 14, n. 2, art. 32, 2009. Disponível em: <https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>. Acesso em: 15 maio 2026.

RUBENSTEIN, Madeleine A.; WEISKOPF, Sarah R.; BERTRAND, Romain; CARTER, Shawn L.; COMTE, Lise; EATON, Mitchell J.; JOHNSON, Ciara G.; LENOIR, Jonathan; LYNCH, Abigail J.; MILLER, Brian W.; MORELLI, Toni Lyn; RODRIGUEZ, Mari Angel; TERANDO, Adam; THOMPSON, Laura M. Climate change and the global redistribution of biodiversity: substantial variation in empirical support for expected range shifts. **Environmental Evidence**, Londres, v. 12, n. 7, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13750-023-00296-0>. Disponível em: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11378804/pdf/13750_2023_Article_296.pdf. Acesso em: 12 maio 2026.

SACHS, Ignacy. **Desenvolvimento incluyente, sustentável, sustentado**. Rio de Janeiro: Garamond, 2004.

SALAZAR, Luis F.; NOBRE, Carlos A.; OYAMA, Marcos D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L09708, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2007GL029695>. Acesso em: 15 maio 2026.

SAMPAIO, Maria Analice dos Santos et al. A fiscalização ambiental e o desmatamento na Amazônia Legal: uma análise para o período de 2004 a 2019. **Espaço Aberto**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 109-130, 2024. DOI: 10.36403/espacoaberto.2024.62654.

SCHMITT, Jair. **Crime sem castigo: a efetividade da fiscalização ambiental para o controle do desmatamento ilegal na Amazônia**. 2015. 188 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/20742>. Acesso em: 10 jul. 2026.

SCIENCE PANEL FOR THE AMAZON. Amazon Assessment Report 2025: Connectivity of the Amazon for a Living Planet. New York: **Sustainable Development Solutions Network**, 2025. Disponível em: <https://www.sp-amazon.org/ar2025>. Acesso em: 11 jul. 2026. DOI: <https://doi.org/10.55161/WZHB2034>.

SCIENCE PANEL FOR THE AMAZON. Secas na Amazônia: policy brief. [S.l.]: Science Panel for the Amazon, 2024. Disponível em: <https://www.sp-amazon.org>. Acesso em: 11 jul. 2026. DOI: <https://doi.org/10.55161/SNWU5050>.

SEN, Amartya. **Desenvolvimento como liberdade**. Tradução de Laura Teixeira Motta. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

SEROA DA MOTTA, Ronaldo. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. Rio de Janeiro: IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 1997. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1540/1/td_0429.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.

SILVA, Carlos Augusto da. **A dinâmica do uso da terra nos locais onde há sítios arqueológicos: o caso da comunidade Cai N'água**, Manaquiri-AM. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2010. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/2528>. Acesso em: 6 maio 2026.

SILVA, Márcia Cristina Rodrigues. **Terra preta arqueológica: das práticas ancestrais às práticas contemporâneas** (um estudo da Comunidade Monte Negro, Iranduba-AM). 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2022. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/9105>. Acesso em: 6 maio 2026.

SPRACKLEN, Dominick V.; ARNOLD, Steven R.; TAYLOR, Christopher M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, Londres, v. 489, p. 282-285, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature11390>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature11390>. Acesso em: 10 maio 2026.

STAAL, Arie; FETZER, Ingo; WANG-ERLANDSSON, Lan; BOSMANS, Joyce H. C.; DEKKER, Stefan C.; VAN NES, Egbert H.; ROCKSTRÖM, Johan; TUINENBURG, Obbe A. Hysteresis of tropical forests in the 21st century. **Nature Communications**, Londres, v. 11, p. 4978, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18728-7>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18728-7>. Acesso em: 10 maio 2026.

STEFFEN, Will; BROADGATE, Wendy; DEUTSCH, Lisa; GAFFNEY, Owen; LUDWIG, Cornelia. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. **The Anthropocene Review**, Londres, v. 2, n. 1, p. 81–98, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2053019614564785>. Acesso em: 14 maio 2026.

STERN, Nicholas. **The Economics of Climate Change: The Stern Review**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511817434>. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/economics-of-climate-change/BE632F647F74E3E2B8734EFC6E6D6812>. Acesso em: 15 maio 2026.

STONE, Christopher D. Should trees have standing? Toward legal rights for natural objects. **Southern California Law Review**, Los Angeles, v. 45, n. 2, p. 450-501, 1972. Disponível em: <https://iseethics.files.wordpress.com/2013/02/stone-christopher-d-should-trees-have-standing.pdf>. Acesso em: 12 maio 2026.

UNEP. **Measuring Progress: Towards Achieving the Environmental Dimension of the SDGs. Nairobi: United Nations Environment Programme**, 2019. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/measuring-progress-towards-achieving-environmental-dimension-sdgs>. Acesso em: 15 maio 2026.

UNEP. **State of Biodiversity in Latin America and the Caribbean. Nairobi: United Nations Environment Programme**, 2010. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8590>. Acesso em: 15 maio 2026.

UNFCCC. **Climate Finance Delivery Plan: Meeting the US\$100 billion goal. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2021**. Disponível em: <https://unfccc.int/topics/climate-finance/resources/climate-finance-delivery-plan>. Acesso em: 15 maio 2026.

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session. Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change**, 2014. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a01.pdf>. Acesso em: 15 maio 2026.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Mainstreaming the economics of nature: a synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB**. Nairobi: UNEP, 2010. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9135>. Acesso em: 15 maio 2026.

VEIGA, José Eli da. **Sustentabilidade: a legitimação de um novo valor**. 3. ed. São Paulo: Senac São Paulo, 2019.

VENEZUELA. **Constitución de la República Bolivariana de Venezuela**. Caracas: Asamblea Nacional Constituyente, 1999. Disponível em: <https://www.asambleanacional.gob.ve/storage/documentos/leyes/constitucion-de-la-republica-bolivariana-de-venezuela-20230306143958.pdf>. Acesso em: 13 maio 2026.

VIEIRA, Kennedy Castanheira; AGUIAR, Denison Melo de; LOPES, Flávio Humberto Pascarelli; CAMPOS, Bruno Patrício de Azevedo; NASCIMENTO, Abdramar Pereira Sousa; TORATI, Junior Henrique Pereira. A importância da integração do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e a Polícia Militar do Amazonas para superar os desafios da preservação ambiental da floresta amazônica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação – REASE**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 1-17, fev. 2026. DOI: 10.51891/rease.v12i2.24188. Disponível em: <https://doi.org/10.51891/rease.v12i2.24188>. Acesso em: 7 mai. 2026.

VILELA, Thais; HARBA, Yara S.; BRIONES-HIDALGO, Elena; COSTA, Marina H.; RIBAS, Camila C.; COSTA, Carlos P.; et al. A better Amazon road network for people and the environment. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, Washington, v. 117, n. 13, p. 7095-7102, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1910853117>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1910853117>. Acesso em: 15 maio 2026.

WAGNER, Fabien H.; FAVRICHON, Samuel; DALAGNOL, Ricardo; HIRYE, Mayumi C. M.; MULLISSA, Adugna; SAATCHI, Sassan. The Amazon's 2023 drought: Sentinel-1 reveals extreme Rio Negro River contraction. **Remote Sensing**, v. 16, n. 6, p. 1056, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16061056>.

WUNDER, Sven. Revisiting the concept of payments for environmental services. **Ecological Economics**, v. 117, p. 234–243, 2015. Disponível em: https://www.cifor.org/publications/pdf_files/articles/AWunder1501.pdf. Acesso em: 15 maio 2026.