



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS (IESA)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ANA PAULA RODRIGUES FEITOSA FRAZÃO

Interações entre Cerrado e Amazônia: avaliação de cenários sobre as mudanças
no uso das terras para 2030, 2050 e 2100

GOIÂNIA - GO
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Ana Paula Rodrigues Feitosa Frazão

3. Título do trabalho

Interações entre Cerrado e Amazônia: avaliação de cenários sobre as mudanças no uso das terras para 2030, 2050 e 2100

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Manuel Eduardo Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 02/02/2026, às 18:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula Rodrigues Feitosa Frazão, Discente**, em 06/02/2026, às 13:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5949830** e o código CRC **5D74BFA9**.

ANA PAULA RODRIGUES FEITOSA FRAZÃO

Interações entre Cerrado e Amazônia: avaliação de cenários sobre as mudanças no uso das terras para 2030, 2050 e 2100

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Estudos Socioambientais (Iesa) da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Doutora em Geografia.

Área de concentração: Natureza e Produção do Espaço

Orientador(a): Dr. Manuel Eduardo Ferreira

GOIÂNIA
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Frazão, Ana Paula Rodrigues Feitosa
Interações entre Cerrado e Amazônia [manuscrito]: avaliação de cenários sobre as mudanças no uso das terras para 2030, 2050 e 2100 / Ana Paula Rodrigues Feitosa Frazão. - 2025.
VII, 117 f.: 2025

Orientador: Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais (Iesa), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiânia, 2025.
Inclui: siglas, mapas, tabelas, gráfico.

1. Clima; Ecossistemas; Desmatamentos; Políticas Ambientais; Intensificação Agropecuária.

I. Ferreira, Manuel Eduardo , orient. II. Título.

CDU 911



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº **63/2025** da sessão de Defesa de Tese de **Ana Paula Rodrigues Feitosa Frazão** que confere o título de Doutora em **Geografia**, na área de concentração em **Natureza e Produção do Espaço**.

Aos sete dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e cinco, a partir das **09:00** horas, **por meio de videoconferência**, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada **“CERRADO - AMAZÔNIA: POLÍTICAS, USO DA TERRA E CENÁRIOS (2030 -2100)”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Manuel Eduardo Ferreira (PPGEO/IESA)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor **Ivanilton Jose de Oliveira (UFG/IESA)**, membro titular externo; Professor Doutor **Venerando Eustáquio Amaro (UFRN)**, membro titular externo, Professor Doutor **Adriano Rodrigues de Oliveira (PPGEO/IESA)**, membro titular interno; Professora Doutora **Elaine Barbosa da Silva (UFG/IESA)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Manuel Eduardo Ferreira (PPGEO/IESA)**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, **aos sete dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e cinco**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Interações entre Cerrado e Amazônia: avaliação de cenários sobre as mudanças no uso das terras para 2030, 2050 e 2100



Documento assinado eletronicamente por **Manuel Eduardo Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 07/11/2025, às 13:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivanilton Jose De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 07/11/2025, às 13:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriano Rodrigues De Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 09/11/2025, às 19:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elaine Barbosa Da Silva, Professora do Magistério Superior**, em 11/11/2025, às 09:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronan Eustaquio Borges, Coordenador de Pós-Graduação**, em 02/02/2026, às 12:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5685824** e o código CRC **FE2AC31C**.

Referência: Processo nº 23070.051040/2025-58

SEI nº 5685824

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que, com paciência e carinho, me ouviram falar sobre esta pesquisa ao longo dos últimos anos. A presença de vocês tornou este processo menos solitário e muito mais significativo.

Registro minha profunda gratidão ao meu orientador, Manuel Eduardo Ferreira, que sempre acreditou em meu trabalho e esteve disposto a contribuir com ideias e soluções valiosas.

De forma especial, agradeço à Sophia Victoria, cuja generosidade e apoio constante foram fundamentais para que eu pudesse enxergar caminhos em momentos de incerteza. Esta tese também é mérito seu.

À minha irmã Andressa, que nunca deixou de expressar orgulho por minha trajetória, e às minhas amigas queridas, Nathalia, Jordana e Ângela, agradeço pela escuta atenta e pela amizade diária. À Heleriany e à Leila, por dividirem cafés, ideias e inspirações ao longo desta caminhada acadêmica.

Ao Silvio Braz, pelo incentivo e pelas palavras de confiança, e à Cecília, que, mesmo tão pequena, compreendeu o significado da palavra “tese” e esteve ao meu lado com amor e paciência.

À minha mãe, que sempre me incentivou a ler e a estudar, deixo minha gratidão por ter plantado em mim o gosto pelo conhecimento.

Aos professores que compuseram a banca examinadora, agradeço pela leitura atenta, pelas críticas construtivas e pelas contribuições que enriqueceram este trabalho.

Por fim, agradeço à CAPES, pelo apoio que me permitiu desenvolver esta pesquisa com tranquilidade, e ao Lapig, laboratório que admiro desde a graduação e no qual tive a honra de realizar o doutorado.

RESUMO

A conversão de ecossistemas naturais em áreas agropecuárias tem sido um dos principais vetores de transformação ambiental no Brasil, especialmente nos biomas Amazônia e Cerrado, que concentram grande parte da produção agrícola e do estoque de carbono do país. Compreender as possíveis trajetórias futuras dessas paisagens é essencial para orientar políticas de conservação e uso sustentável do território. Este estudo analisou as trajetórias futuras de uso e cobertura da terra na Amazônia e no Cerrado, modelando cenários para os anos de 2030 e 2100, com base em diferentes taxas de desmatamento e contextos de pressão antrópica. Os resultados indicam que o Cerrado tende a se esgotar mais rapidamente nas primeiras décadas, registrando perdas anuais elevadas de vegetação nativa entre 2030 e 2050, enquanto a Amazônia absorve a maior parte da pressão no longo prazo, com aceleração das taxas de desmatamento entre 2050 e 2100. Essa dinâmica revela a forte interdependência entre os biomas, na medida em que a redução de áreas disponíveis no Cerrado impulsiona a expansão sobre a Amazônia. As discussões evidenciam que a expansão agrícola pode ocorrer sem novos desmatamentos, aproveitando áreas já antropizadas, em geral degradadas, dependendo, no entanto, de políticas de ordenamento territorial e da intensificação sustentável da pecuária. Além disso, a efetividade de políticas públicas, como o Código Florestal, e de compromissos privados, como a Moratória da Soja e os Acordos da Pecuária, são cruciais para conter novos desmatamentos da vegetação nativa. A integração desses instrumentos e a ampliação de sua aplicação ao Cerrado poderiam evitar emissões expressivas de carbono e contribuir para a conservação da biodiversidade e regulação climática. Conclui-se que o futuro da Amazônia e do Cerrado dependerá não apenas das taxas de desmatamento, mas também da capacidade de implementar estratégias produtivas que desacoplem a expansão agrícola da supressão florestal. A intensificação da pecuária, o uso de áreas já abertas e a adoção efetiva de políticas públicas e privadas são caminhos centrais para alinhar a produção agropecuária com a conservação ambiental.

Palavras-chave: Clima; Ecossistemas; Desmatamentos; Políticas ambientais; Intensificação agropecuária.

ABSTRACT

The conversion of natural ecosystems into agricultural areas has been one of the main drivers of environmental change in Brazil, especially in the Amazon and Cerrado biomes, which concentrate much of the country's agricultural production and carbon stock. Understanding the possible future trajectories of these landscapes is essential to guide conservation policies and the sustainable use of the territory. This study analyzed the future trajectories of land use and land cover in the Amazon and Cerrado biomes, modeling scenarios up to 2100 based on different deforestation rates and contexts of anthropic pressure. The results indicate that the Cerrado tends to be depleted more quickly in the early decades, with high annual losses of native vegetation between 2030 and 2050, while the Amazon absorbs most of the pressure in the long term, with accelerated deforestation rates between 2050 and 2100. This dynamic reveals the strong interdependence between the biomes, as the reduction of available areas in the Cerrado drives expansion into the Amazon. The discussions highlight that agricultural expansion can occur without new deforestation, making use of already cleared areas, but this depends on land-use planning policies and the sustainable intensification of livestock. Moreover, the effectiveness of public policies, such as the Forest Code, and private commitments, such as the Soy Moratorium and Cattle Agreements, is crucial to contain native vegetation conversion. Integrating these instruments and extending their application to the Cerrado could avoid significant carbon emissions and contribute to biodiversity conservation. The study concludes that the future of the Amazon and Cerrado will depend not only on deforestation rates but also on the capacity to implement productive strategies that decouple agricultural expansion from forest suppression. Livestock intensification, the use of already cleared lands, and the effective adoption of public and private policies are central paths to align agricultural production with environmental conservation.

Keywords: Climate; Ecosystems; Deforestation; Environmental policies; Agricultural intensification.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- ABIEC** – Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne
- APP** – Área de Preservação Permanente
- CAR** – Cadastro Ambiental Rural
- CAPES** – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
- CDB** – Convenção sobre Diversidade Biológica
- CO₂** – Dióxido de Carbono
- CONAVEG** – Comissão Nacional para Recuperação da Vegetação Nativa
- COP** – Conference of the Parties (Conferência das Partes da ONU sobre Mudança do Clima)
- DETER** – Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real
- FNMA** – Fundo Nacional do Meio Ambiente
- GEE** – Gases de Efeito Estufa
- IBAMA** – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICMBio** – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPEA** – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
- LULC** – Land Use/Land Cover (Uso e Cobertura da Terra)
- MAPA** – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
- MAPBIOMAS** – Mapeamento Anual de Uso e Cobertura da Terra no Brasil
- MATOPIBA** – Região que compreende Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
- MMA** – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
- ONU** – Organização das Nações Unidas
- PAM** – Produção Agrícola Municipal
- PPCDAm** – Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
- PLANAVEG** – Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa
- PPGEO** – Programa de Pós-Graduação em Geografia
- PPM** – Pesquisa Pecuária Municipal
- PRODES** – Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
- RAD** – Relatório Anual de Desmatamento

RL – Reserva Legal

SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação

UC – Unidade de Conservação

UF – Unidade da Federação

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima)

SUMÁRIO

Introdução Geral	7
Problemática da investigação e questões de pesquisa	8
Hipótese da pesquisa	11
Objetivo geral	12
Objetivos específicos	12
Capítulo 1 - Fundamentação Teórica	13
1.1 A flexibilização das leis ambientais no Brasil	16
1.2 A dinâmica do desmatamento nos biomas Cerrado e Amazônia	23
1.3 Estatísticas da agropecuária no Cerrado e Amazônia	30
1.4 Uso e cobertura da terra	38
1.5 As unidades de conservação dos biomas Cerrado e Amazônia	41
1.6 Modelagens de cenários futuros da Amazônia e do Cerrado	49
Capítulo 2 - Cenários Futuros para a Amazônia: 2030 – 2100	50
1. Introdução	50
2. Materiais e métodos	52
3. Resultados e discussões	63
4. Conclusão	74
5. Referências bibliográficas	75
Capítulo 3 - Cenários Futuros para o Cerrado: 2030 – 2100	76
6. Introdução	77
7. Materiais e métodos	79
8. Resultados e discussões	89
9. Conclusão	99
10. Referências bibliográficas	100
Capítulo 4 – Análise da relação entre as mudanças de uso e cobertura da terra entre os Biomas Amazônia e Cerrado (2030 – 2100)	101
11. Introdução	101

12. Materiais e métodos	103
13. Resultados e discussões	105
14. Conclusão	114
15. Referências bibliográficas	115
Considerações Finais da Tese	116

Introdução Geral

Os biomas Amazônia e Cerrado ocupam aproximadamente 70% do território brasileiro e são reconhecidos mundialmente por sua relevância socioambiental. A Amazônia é a maior floresta tropical do planeta, essencial para a regulação climática global e para a manutenção de fluxos hidrológicos em larga escala, enquanto o Cerrado é considerado a savana mais biodiversa do mundo, desempenhando papel crucial na recarga de aquíferos e na formação de importantes bacias hidrográficas nacionais (Miziara; Ferreira, 2008; Colman et al., 2024). Além de sua importância ecológica, ambos são centrais para a produção agropecuária brasileira: concentram mais de 50% do rebanho bovino e cerca de 60% da produção de grãos do país (Brasil, 2024).

Nas últimas décadas, esses biomas vêm sendo submetidos a intensas transformações pelo avanço das atividades antrópicas. O Cerrado já perdeu mais da metade de sua vegetação original, com taxas anuais de desmatamento que, proporcionalmente, superam as registradas na Amazônia (Sousa, 2017; RAD, 2023; RAD, 2025). Embora a Amazônia concentre maior atenção internacional e políticas mais robustas de controle, este bioma continua apresentando elevadas taxas de supressão florestal, segundo dados do PRODES e do MapBiomas (INPE, 2019; PRODES, 2022; MapBiomas, 2023). Essas mudanças no uso e cobertura da terra têm efeitos diretos sobre o clima, a biodiversidade e a conectividade dos ecossistemas, comprometendo serviços ambientais em escala regional e global (Fearnside, 2005; Strassburg et al., 2017).

Um aspecto central desse processo é a desigualdade da governança ambiental entre os dois biomas. Desde os anos 2000, a Amazônia foi alvo de políticas inovadoras, como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento (PPCDAm), a Moratória da Soja e os Acordos da Pecuária, que contribuíram para reduzir temporariamente as taxas de supressão (Gibbs et al., 2015; Fonseca et al., 2023). Já o Cerrado, este permanece menos protegido: o Código Florestal exige apenas 20% de Reserva Legal em grande parte do bioma, contrastando com os 80% da Amazônia, o que fragiliza sua conservação (Lei nº 12.651/2012; Soares-Filho et al., 2014). Essa assimetria tende a deslocar parte da pressão agropecuária da floresta amazônica para o Cerrado, intensificando os riscos socioambientais (Ferreira; Miziara, 2008; Colman et al., 2024).

No cenário global, o Brasil assumiu compromissos climáticos no Acordo de Paris, ainda no ano de 2015 (durante a COP 21), visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa em até 43% até 2030. Entretanto, tais metas só poderão ser alcançadas mediante a contenção do desmatamento nos dois biomas e a adoção de práticas produtivas

sustentáveis (Brasil, MAPA, 2023; Fonseca et al., 2023). O fato é que o Brasil figura entre os 5 maiores emissores globais, justamente pelas mudanças no uso da terra nestes dois biomas, relacionadas aos desmatamentos, queimadas e expansão da agropecuária (World Bank, 2023; Dutra et al., 2024). Apesar dos avanços em monitoramento e modelagem ambiental (MapBiomas, 2022; PRODES, 2023), ainda são escassos os estudos que projetam cenários até o final do século e que analisam de forma conjunta os dois biomas, cujas interações vão além da condição de ecótonos.

Nesse contexto, esta tese busca contribuir para a compreensão integrada da dinâmica futura sobre o uso e cobertura da terra na Amazônia e no Cerrado até o ano de 2100. Para tanto, desenvolveu-se metodologias computacionais inspiradas nas plataformas Dinamica EGO e TerrSet, permitindo maior flexibilidade e replicabilidade nas simulações espaciais. Três cenários foram considerados – otimista, tendencial (*business as usual*) e pessimista – refletindo diferentes níveis de governança ambiental.

A tese está estruturada em três artigos científicos. O primeiro aborda as projeções para a Amazônia, destacando a vulnerabilidade da floresta diante de cenários de baixa governança. O segundo foca no Cerrado, evidenciando sua fragilidade legal e o risco crescente para as esparsas áreas protegidas. O terceiro integra os resultados, discutindo como a pressão sobre o Cerrado retroalimenta a expansão sobre a Amazônia, e vice-versa, reforçando a necessidade de políticas públicas articuladas e de estratégias integradas de conservação entre os dois maiores biomas da América do Sul.

Problemática da investigação e Questões de Pesquisa

Desde meados da década de 1970, a vegetação dos biomas Amazônia e Cerrado tem sido alvo de desmatamento, expansão e intensificação agrícola (Coe et al., 2017). No Brasil, atualmente há 416 milhões de hectares ocupados por agricultura e pastagens, o que resultou em grande perda de áreas naturais: aproximadamente 46% do Cerrado e 17% da Amazônia já foram desmatados (MapBiomas, 2023). Em 2021, registrou-se um declínio de 1.852.314 hectares de vegetação nativa nesses biomas (MapBiomas, 2022). De acordo com o RAD 2024, entre 2019 e 2024 o Brasil perdeu 9,88 milhões de hectares de vegetação nativa, sendo o Cerrado o bioma mais desmatado em 2024 (52,5% do total nacional), seguido pela Amazônia (30,4%). Nesse período, a Amazônia acumulou 4,85 milhões de hectares de perdas, enquanto o Cerrado chegou a quase 4 milhões de hectares (RAD, 2024). Vale ressaltar que o Cerrado e a Amazônia são regiões-alvo do Plano

Nacional de Mudanças Climáticas (Brasil, 2008), cujo objetivo é reduzir as emissões de carbono por meio do combate ao desmatamento ilegal.

Mais recentemente, o governo federal lançou e reforçou instrumentos complementares, como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal – 5ª fase (2023-2027) (MMA, 2023), que retoma a estratégia nacional de combate ao desmatamento, e o programa federal de redução de desmatamento e incêndios na Amazônia, criado em setembro de 2025 para apoiar 70 municípios prioritários com ações de regularização ambiental e fundiária (Agência Brasil, 2025). Além disso, destaca-se o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa – Planaveg (2025-2028), que tem como meta restaurar ou regenerar 12 milhões de hectares até 2030, compromisso reiterado pelo Brasil nas últimas Conferências das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COPs da UNFCCC) (MMA/CONAVEG, 2024; UNFCCC, 2023). As mudanças climáticas podem resultar em condições mais quentes e secas para grande parte da fronteira agrícola nesses biomas (Duffy et al., 2015).

Lovejoy e Nobre (2018) demonstram que, quando o desmatamento atingir 40% na Amazônia, ocorrerá o fenômeno conhecido como "tipping point" — ponto sem retorno, em que a floresta tropical pode migrar para fitofisionomias de savana, com redução de chuvas e aumento das secas prolongadas. Contudo, devido à sinergia entre desmatamento, mudanças climáticas e uso generalizado do fogo, esse limiar pode ocorrer já em torno de 25% de desmatamento na região (Lovejoy & Nobre, 2018). Estudos mais recentes apontam que sinais desse processo já estão em curso: partes da Amazônia, especialmente no setor sudeste, apresentam balanço de carbono positivo, atuando como emissoras líquidas de CO₂ em períodos de seca severa (Artaxo et al., 2023). Além disso, análises de resiliência indicam que entre 10% e 47% da floresta pode estar exposta a perturbações múltiplas (seca, calor, incêndios e desmatamento), o que reforça a preocupação de que o ponto de inflexão esteja se aproximando mais rapidamente do que se estimava anteriormente (Flores et al., 2023; Nobre et al., 2024).

Frente a este processo de degradação crescente, a população mundial pode ultrapassar 9,7 bilhões em 2050, exigindo maior oferta de alimentos (ONU, 2022). Labim et al. (2013) projetam que, até 2030, entre 81 e 147 milhões de hectares adicionais de terras agriculturáveis serão necessários em comparação a 2000 — referência essencial para comparação de conversões futuras.

O Cerrado tem apresentado expansão agrícola mais intensa em comparação à Amazônia (Bustamante & Ferreira, 2010), embora este último tenha sido o bioma mais desmatado entre 2019 e 2021 (anos em que as políticas ambientais na região recrudesceram de forma marcante, sob governo do “inominável”), impulsionado pela criação de pastagens como forma de reserva fundiária. Esse panorama evidencia a importância econômica, social e ambiental dessas áreas para o Brasil (Parente & Ferreira, 2018; Parente et al., 2019) e, sobretudo, evidencia a importância de políticas de estado (e não de governo), mais perenes a longo prazo.

Costa e Pires (2009) mostram que o desmatamento na Amazônia afeta ecossistemas vizinhos, incluindo o Cerrado. Sem a proteção adequada do Cerrado, intervenções na Amazônia não impedirão transições ecológicas em larga escala. Além disso, o desmatamento no Cerrado acentua o déficit hídrico no arco do desmatamento e acelera a “savanização” da Amazônia (Malhado et al., 2010).

Na história recente de monitoramento destes biomas, em 2019, Amazônia e Cerrado representaram 96,7% do desmatamento nacional, com 770.148 ha na Amazônia (63,2%) e 408.646 ha no Cerrado (33,5%). Naquele ano, 46% do Cerrado estava convertido para uso antrópico, dos quais 43% destinavam-se ao agronegócio (MapBiomas, 2020). Projeções realizadas por Ferreira et al. (2012), para o Cerrado, indicam que 53,5% do bioma estarão convertidos até 2050, estimando-se 4 milhões de hectares desmatados por década (entre 2010 e 2050), orientados para a expansão do agronegócio. No entanto, números mais recentes, entre 2019 e 2024, anunciados pelos Relatórios Anuais de Desmatamentos (RAD) do MapBiomas, indicam uma taxa ainda maior, e, portanto, mais intensa até 2050, com área média desmatada de 600 mil hectares ao ano, ou de 6 milhões de hectares em uma década. Tais números trazem um alerta ainda mais grave, para conter este processo, a fim de preservar a maior área possível do Cerrado até meados deste século.

Por outro lado, na revisão de literatura realizada nesta tese, revela-se que as modelagens de cenários normalmente utilizam dados defasados, carecendo de foco na expansão do agronegócio, bem como na interação entre fronteiras em ambos os biomas. Compreender essa expansão e projetar cenários futuros para Amazônia e Cerrado, ao mesmo tempo, é vital para reflexões sobre conservação, clima, conflitos e políticas ambientais, especialmente no momento em que as mudanças climáticas se acentuam no país, em paralelo com esforços para a criação do Instituto Nacional do Cerrado e de políticas mais efetivas para a redução dos desmatamentos neste bioma central e

fortemente ameaçado. Essa interdependência foi recentemente ressaltada em artigo de opinião publicado na Folha de S. Paulo, no qual reitores de universidades federais destacam que Cerrado e Amazônia formam um contínuo ecológico, social e climático, de modo que a degradação de um compromete a sobrevivência do outro (LIMA; NAVES; CARVALHO, 2025).

Desta forma, as perguntas de pesquisa desta tese são:

1. Quais os cenários futuros do agronegócio na Amazônia e no Cerrado, entre 2030 e 2100, considerando diferentes contextos ambientais e legais?
2. Como as políticas de proteção da Amazônia, observadas em um contexto internacional (vide COP 30 em Belém do Pará, Brasil), influenciam na pressão do agronegócio sobre os recursos naturais do bioma Cerrado?
3. Como a redução de áreas disponíveis para conversão no Cerrado, e de novas políticas de proteção ambiental, podem influenciar o aumento da pressão do agronegócio na Amazônia?
4. Como conjugar a proteção dos dois maiores biomas da América do Sul, com perspectivas que valorizem a sociobiodiversidade de ambos no século XXI?

Hipótese da Pesquisa

Esta tese centra-se nas seguintes hipóteses:

- 1) A restrição de áreas convertíveis no bioma Cerrado, por meio de novas políticas governamentais, aumentará a pressão antrópica sobre o bioma Amazônia, intensificando o desmatamento no segundo, com cenários preocupantes de expansão de cultivos e pastagens entre 2030 – 2100.
- 2) Políticas de proteção da Amazônia, fortemente influenciadas por decisões de blocos de países importadores de *commodities* agrícolas, acabam por intensificar a expansão dos desmatamentos no Cerrado, ao longo dos cenários 2030 – 2100.

Objetivo Geral

O objetivo desta tese é analisar a dinâmica de uso e cobertura da terra nos biomas Cerrado e Amazônia, por meio de cenários futuros entre 2030 – 2100, considerando períodos históricos e a governança ambiental atual.

Objetivos específicos

1. Analisar como políticas públicas e a legislação ambiental influenciam a conversão de terras nos biomas Amazônia e Cerrado;
2. Simular cenários de ocupação para os biomas Amazônia e Cerrado, nos anos de 2030, 2050 e 2100, considerando condições otimistas, tendenciais e pessimistas;
3. Analisar se as fronteiras agrícolas atuais (AMACRO e MATOPIBA) se mantêm nas projeções futuras ou se novas áreas de expansão agrícola emergem nos biomas Amazônia e Cerrado.

Capítulo 1 – Fundamentação Teórica

1.1 A flexibilização das leis ambientais no Brasil

Historicamente, em 1996, com a criação do Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), iniciou-se um período de consolidação das políticas e instrumentos ambientais no Brasil. A Política Nacional de Recursos Hídricos foi instituída em 1997 (Lei nº 9.433/1997); a Lei de Crimes Ambientais foi promulgada em 1998 (Lei nº 9.605/1998), criminalizando o desmatamento; e, em 2000, foi instituído o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), por meio da Lei nº 9.985/2000. Entre 1999 e 2012, diversas ações e medidas voltadas à formulação e implementação de políticas públicas ambientais foram desenvolvidas, caracterizando-se por avanços substanciais e pela consolidação institucional, resultando em uma redução significativa nas taxas anuais de desmatamento nos anos subsequentes (Fonseca et al., 2023).

Em 2001, o Código Florestal foi alterado, ampliando a exigência de Reserva Legal em propriedades rurais de 50% para 80% nas áreas de floresta nativa e de 20% para 30% nas áreas de Cerrado situadas na Amazônia Legal. Essas medidas favoreceram a conservação da vegetação nativa e da biodiversidade, além de reforçarem o combate e a fiscalização do desmatamento ilegal. Ressalta-se que, desde 1988, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) já monitorava o desmatamento por meio do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES), que utiliza imagens de satélite para gerar dados anuais (INPE, 2019). Em 2004, o INPE também desenvolveu o Sistema de Detecção de Desmatamento em Tempo Real (DETER), que fornece alertas diários de desmatamento e identifica pontos críticos de pressão na floresta (Marques, 2019).

No ano de 2007, foi criado o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), responsável por propor, implantar, gerir, proteger, monitorar e fiscalizar as Unidades de Conservação, constituindo um marco institucional para a conservação da biodiversidade e a sustentabilidade ambiental no Brasil.

Em 2010, intensificaram-se os debates sobre um novo Código Florestal, que foi sancionado em 25 de maio de 2012, por meio da Lei nº 12.651/2012. O novo código flexibilizou regras em relação aos crimes de desmatamento ilegal cometidos antes de 2008, apresentando critérios mais brandos para a definição de Áreas de Preservação

Permanente (APP) e Reservas Legais (RL). Essa flexibilização contribuiu para o aumento das taxas de desmatamento a partir de 2013 (Soares-Filho et al., 2014).

Contudo, o período entre 2018 e 2019 foi marcado por um retrocesso sem precedentes, no qual autoridades responsáveis pela defesa das políticas ambientais associaram-se ao desmonte ativo dessas políticas (Fonseca et al., 2023). Os anos de 2019 e 2020 foram caracterizados pela flexibilização das leis ambientais, pela simplificação de normas e pela intensificação dos impactos ambientais na Amazônia, incluindo a atuação de organizações criminosas envolvidas na invasão de terras indígenas para desmatamento e garimpo ilegal.

Entre janeiro e junho de 2020, por exemplo, a Amazônia registrou 2.108 km² de desmatamento acima da média dos quatro anos anteriores (2016–2019), o que representa um incremento de aproximadamente 46% (Walker, 2020). Associado a esse desmatamento, ocorreram grandes incêndios nos anos de 2019 e 2020, muitos dos quais atribuídos a ações articuladas e criminosas (Silva et al., 2021).

A intensificação dos desmatamentos e queimadas gera preocupação na sociedade civil, pois contribui para o aumento da emissão de CO₂ e outros gases de efeito estufa (GEE), além de estar diretamente relacionada à perda de biodiversidade. Esses retrocessos, ocorridos entre 2019 e 2022, podem comprometer o futuro dos biomas brasileiros, afetando a médio e longo prazo atividades econômicas que dependem de serviços ecossistêmicos, especialmente os fornecidos pela vegetação amazônica.

A erosão das normas ambientais evidencia uma desregulação isenta de debate público, conduzida por meio de “reformas infralegais” – portarias, instruções normativas e atos administrativos – que não dependem de aprovação do Congresso (Bronz et al., 2020). Entre março e maio de 2020, o Executivo Federal publicou 195 atos no Diário Oficial da União relacionados à gestão ambiental, incluindo decretos que retiraram a autonomia de órgãos de proteção ambiental. Um exemplo é o Decreto nº 10.341, de 6 de maio de 2020, que atribuiu às Forças Armadas o combate a incêndios e ao desmatamento na Amazônia, inclusive em Unidades de Conservação, terras indígenas e outras áreas federais.

Entre as terras indígenas sob responsabilidade das Forças Armadas estava a dos Yanomami. Estatísticas do Ministério da Saúde indicam que, entre 2019 e 2022, o número de mortes de crianças Yanomami por desnutrição aumentou 331%, totalizando 177 mortes. No mesmo período, dados do PRODES (2022) apontaram crescimento do desmatamento em terras indígenas.

O Poder Executivo também enviou ao Congresso o Projeto de Lei nº 2.633/2020, visando à regularização de grandes propriedades privadas em terras públicas invadidas, sem análise prévia e sem punição pelos crimes ambientais cometidos. Essa proposta de anistia incentiva a ocupação e o desmatamento de novas áreas, permitindo que os titulares mantenham os imóveis mesmo em caso de desmatamento ilegal, por até 10 anos após o recebimento do título (Bronz, 2020).

Em 2019, o controle da madeira para exportação deixou de ser realizado pelo IBAMA desde a origem, sob a justificativa de falta de servidores e alta demanda por fiscalização. Além disso, o Decreto nº 9.760/2019 suspendeu a cobrança de multas aplicadas pelo IBAMA e pelo ICMBio até a realização de audiência de conciliação, dificultando a punição por desmatamento ilegal. Também foi eliminado o prazo para inscrição no Cadastro Ambiental Rural (CAR), reduzindo a pressão sobre os produtores para regularizar suas propriedades.

A pressão por desmatamento e conversão da terra na Amazônia não se deve apenas a agentes internos, mas também a um contexto internacional. A terra tornou-se um dos principais ativos financeiros globais, incentivando sua concentração para especulação ou exploração agrícola. Segundo Malerba (2020), o agronegócio, que inclui empresas de capital aberto e multinacionais, visa diversificar ativos e adotar estratégias territoriais para maximizar lucros.

A incorporação e concentração de novas áreas eleva constantemente o valor da terra, tornando-a um ativo atrativo mesmo em períodos de queda nos preços das commodities, o que leva empresas a investirem em terras independentemente da produção agrícola (Malerba, 2020). Dados da Informa Economics IEG/FNP mostram que, no Matopiba, uma das principais fronteiras agrícolas do Brasil, o preço da terra no Tocantins valorizou-se, em média, 273% entre 2003 e 2018.

A flexibilização da legislação ambiental representa mais um passo na dinâmica global de acumulação de capital, em sua etapa de financeirização, com impactos negativos para o meio ambiente, já que estudos apontam os efeitos do descontrole do desmatamento (Brito et al., 2006; Oliveira et al., 2022; Favoretto et al., 2012; Fonseca et al., 2023).

As mudanças no uso e cobertura da terra voltadas ao agronegócio contribuem significativamente para os impactos ambientais e climáticos. A Amazônia e o Cerrado são reguladores climáticos globais e, desde a década de 1970, vêm sendo alvo da expansão agropecuária.

Portanto, esses eventos são reflexo de uma governança ambiental deficiente. O governo brasileiro não instituiu novas políticas públicas para combater os incêndios florestais e o desmatamento (Oliveira et al., 2022). Ao contrário, o orçamento de 2021 proposto para o Ministério do Meio Ambiente foi o menor em 21 anos. Recursos destinados à fiscalização ambiental e ao combate a incêndios foram reduzidos de R\$ 194 milhões em 2019 para R\$ 175 milhões em 2020, com previsão de apenas R\$ 127 milhões em 2021 (Mengassi, 2021). Essa abordagem contrasta com políticas adotadas em outros países, que visam controlar incêndios e desmatamentos para reduzir riscos ambientais (Schmidt et al., 2018; Oliveira et al., 2021).

1.2 A dinâmica do Desmatamento nos biomas Cerrado e Amazônia

Os dados do PRODES indicam que, no ano de 2022, aproximadamente 12.052 km² foram desmatados no bioma Amazônia e 10.689 km² no Cerrado, totalizando 22.741 km² de áreas desmatadas (Figura 1).

Em 2021, o PRODES registrou desmatamentos de 12.188 km² na Amazônia e 8.531 km² no Cerrado (Tabela 1). O MapBiomas Alerta, que também detectou desmatamentos entre 2019 e 2021, apontou valores ligeiramente inferiores para 2021, com 9.775 km² desmatados na Amazônia e 5.005 km² no Cerrado (Figura 2). Comparando-se os dados do PRODES com os do MapBiomas Alerta, observa-se uma diferença de aproximadamente 29%, o que corresponde a 5.938 km² a menos, considerando a soma dos dois biomas.

Essa diferença na área desmatada entre os dois produtos pode ser atribuída aos distintos métodos utilizados para mapear o desmatamento. Embora ambos utilizem imagens Landsat como base, o MapBiomas Alerta refina seus dados com imagens diárias de alta resolução espacial, além de cruzar informações sobre limites geográficos, recortes fundiários e situação administrativa. O resultado é um laudo detalhado para cada evento de desmatamento detectado no Brasil (MapBiomas, 2022). O PRODES, por sua vez, emprega o conceito de máscara acumulativa, agregando o desmatamento mapeado nos anos anteriores em uma base integrada, que contém todas as áreas de desmatamento por corte raso já detectadas. Essa máscara é utilizada para evitar que áreas de desmatamento antigas, já mapeadas, sejam identificadas novamente (INPE, 2019).

Nos últimos dez anos, o desmatamento anual na Amazônia aumentou de 4.128 km² em 2012 para 12.052 km² em 2022 (Tabela 1), representando um crescimento de

7.924 km², um incremento expressivo em um período relativamente curto. Entre 2012 e 2018, o desmatamento apresentou uma tendência de crescimento mais estável, com uma taxa média de aproximadamente 1.000 km² adicionais por ano. No entanto, em 2019, observou-se um salto significativo: os 6.945 km² desmatados em 2018 aumentaram para 10.699 km² (Tabela 1).

Figura 1: Área de desmatamento por município nos Biomas Amazônia e Cerrado (PRODES, 2023).

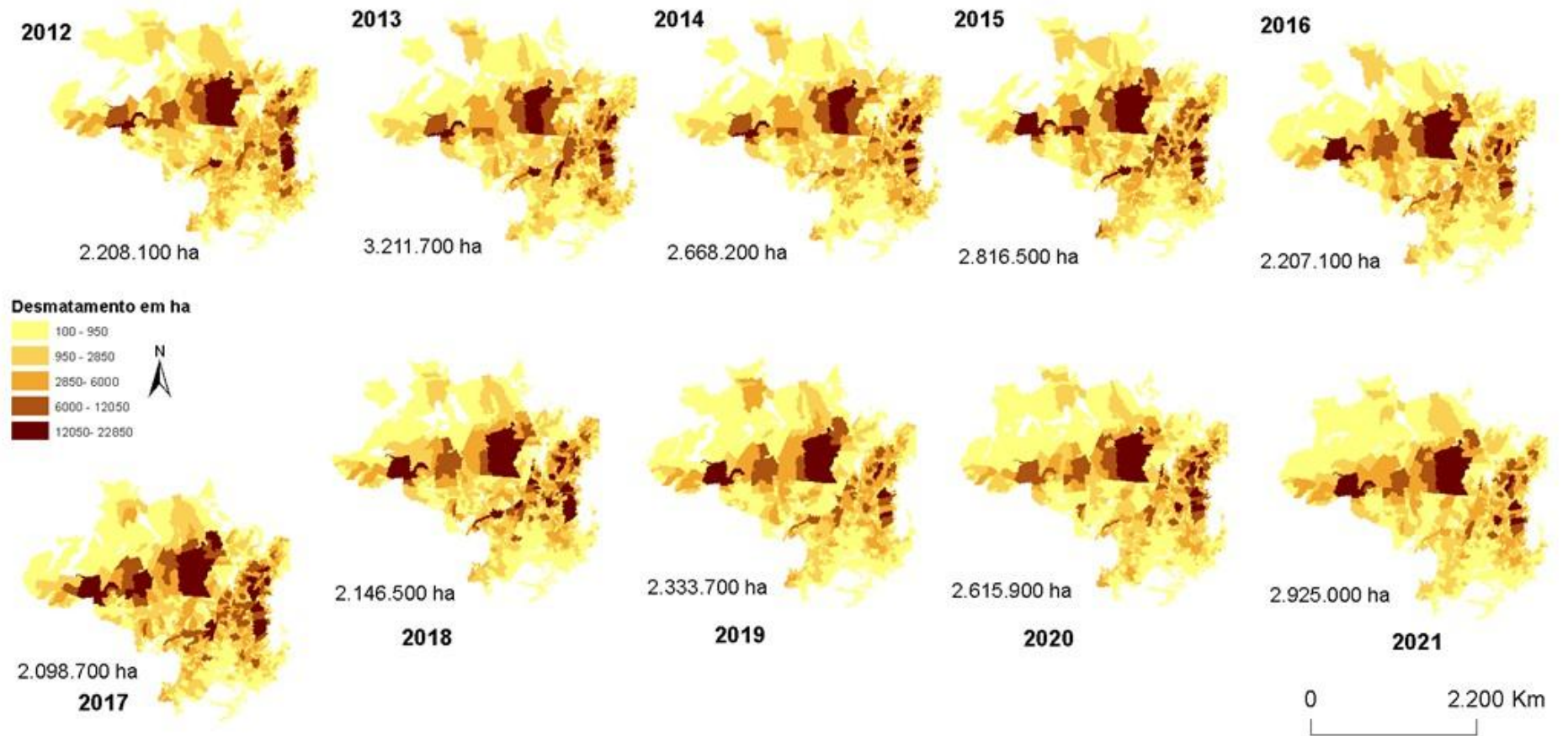
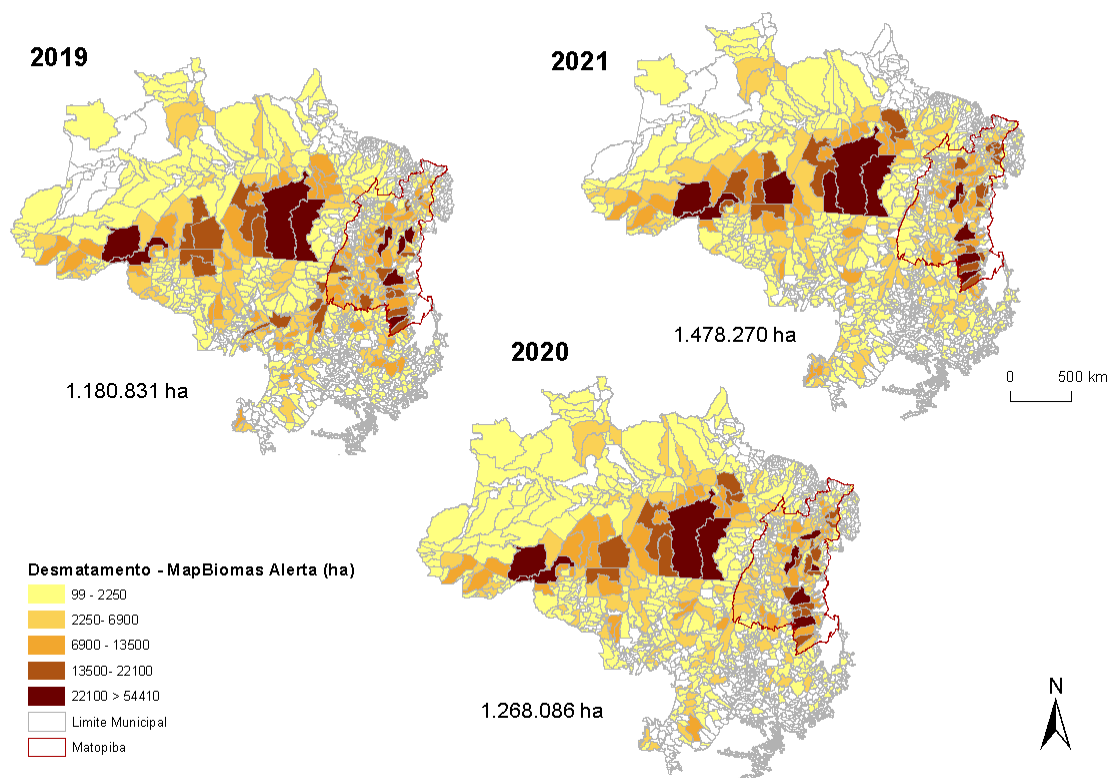


Tabela 1: Área dos desmatamentos detectados pelo Prodes nos biomas Amazônia e Cerrado (km²).

Ano	Cerrado	Amazônia	Total
2012	8.976	4.128	13.104
2013	13.482	5.153	18.635
2014	10.904	4.874	15.778
2015	11.129	5.907	17.036
2016	7.497	7.077	14.574
2017	7.117	6.752	13.869
2018	7.260	6.945	14.205
2019	6.319	10.699	17.018
2020	7.905	10.349	18.254
2021	8.531	12.188	20.719
2022	10.689	12.052	22.741

Fonte: Prodes (2022).

Figura 2: Área desmatada na Amazônia e Cerrado com base no MapBiomas Alerta (2023).

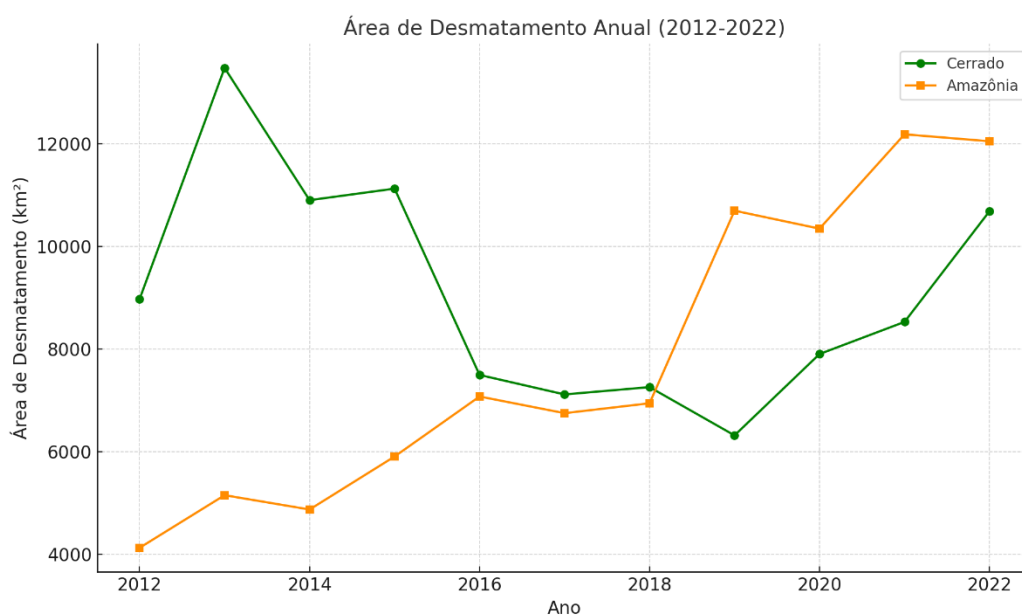


A dinâmica do desmatamento no Cerrado, nos últimos dez anos, ocorreu de forma mais acelerada do que no bioma Amazônia. Esse fato se deve à legislação mais flexível no que diz respeito à conversão e uso da terra no Cerrado, associada a uma produção agrícola já consolidada e ao fácil acesso ao crédito rural (Sousa, 2017). Em 2013, o

desmatamento anual no Cerrado já alcançava 13.482 km², sendo o maior valor registrado na última década. Em 2016, o desmatamento apresentou uma queda, estabilizando-se em uma média de 7.000 km² por ano. No entanto, voltou a crescer em 2022, atingindo 10.689 km² (Tabela 1).

Os dados do PRODES oferecem uma série histórica extensa, e, ao se observar a Figura 3 juntamente com os dados anteriores, nota-se que, embora a perda da cobertura vegetal em ambos os biomas siga dinâmicas próprias, há uma convergência no aumento do desmatamento no ano de 2019.

Figura 3: Dinâmica do desmatamento entre 2012 e 2022 com base nos dados PRODES.



Além disso, ao observar a distribuição espacial, nota-se que tanto nos mapeamentos realizados com dados do PRODES quanto com os do MapBiomas Alerta, as regiões com maiores taxas de desmatamento coincidem. As áreas mais afetadas concentram-se nos estados do Pará, Amazonas, Mato Grosso e na região conhecida como Matopiba. Quatro estados possuem territórios abrangendo ambos os biomas, Cerrado e Amazônia: Pará, Mato Grosso, Maranhão e Tocantins.

Os elevados índices de desmatamento nos biomas Cerrado e Amazônia representaram, juntos, 89,2% de todo o desmatamento ocorrido no Brasil em 2021. De acordo com dados do MapBiomas (Tabelas 2 e 3), os cinco estados que, em 2021, concentraram aproximadamente 55% do desmatamento nacional estão localizados nos biomas Cerrado e Amazônia.

O Pará foi o estado mais desmatado em 2021 e 2022. Em 2021, registrou desmatamentos de 4.017 km² em sua porção pertencente à Amazônia e 8,15 km² no Cerrado, totalizando 4.025 km², o que corresponde a aproximadamente 24% da área desmatada em todo o Brasil. Em 2022, o Pará novamente liderou o ranking nacional, com uma área total desmatada de 4.678 km².

O estado do Amazonas apresentou um aumento expressivo na área desmatada entre 2020 e 2021. Em 2020, ocupava a quarta posição entre os estados mais desmatados do país, com 1.295 km² desmatados. Em 2021, passou a ser o segundo estado com maior desmatamento, somando 1.945 km², o que representa 11,8% do total nacional em 2021.

O Mato Grosso ocupou a terceira posição em 2021, com uma perda de cerca de 1.899 km² (11,9%), dos quais 1.881 km² situam-se nos biomas Cerrado e Amazônia. Em seguida, aparece o Maranhão, com 1.670 km² (10,1%), sendo 1.669 km² localizados no Cerrado e Amazônia. A Bahia registrou 1.521 km² de desmatamento (9,2%), dos quais 959 km² ocorreram no bioma Cerrado.

Tabela 2: Área ocupada por desmatamento (em km²) por estado na Amazônia.

Estado	2019	2020	2021
Acre	578,24	565,77	641,47
Amapá	14,88	16,53	7,80
Amazonas	1.260,87	1.295,37	1.944,98
Maranhão	98,84	140,73	115,37
Mato Grosso	1.319,13	1.432,33	1.517,97
Pará	2.984,46	3.687,88	4.016,72
Rondônia	1.220,04	1.142,32	1.299,41
Roraima	240,01	220,13	216,89
Tocantins	5,46	14,13	14,19
Total	7.721,94	8.515,18	9.774,79

Fonte: MapBiomas (2022).

Tabela 3: Área ocupada por desmatamento (em km²) por estado no Cerrado.

Estado	2019	2020	2021
Bahia	546,64	721,92	959,07
Distrito Federal	0,96	1,52	1,27
Goiás	331,78	319,58	313,23
Maranhão	719,31	1.497,30	1.553,86
Mato Grosso	675,99	383,57	363,02
Mato Grosso do Sul	155,66	192,48	283,56
Minas Gerais	225,83	190,34	311,15
Pará	1,49	4,33	8,15
Paraná	0,13	0,12	-
Piauí	392,61	492,15	576,13
Rondônia	2,57	4,25	3,22
São Paulo	1,37	0,98	0,27
Tocantins	1.021,47	667,73	630,23
Total Geral	4.075,82	4.476,15	5.003,28

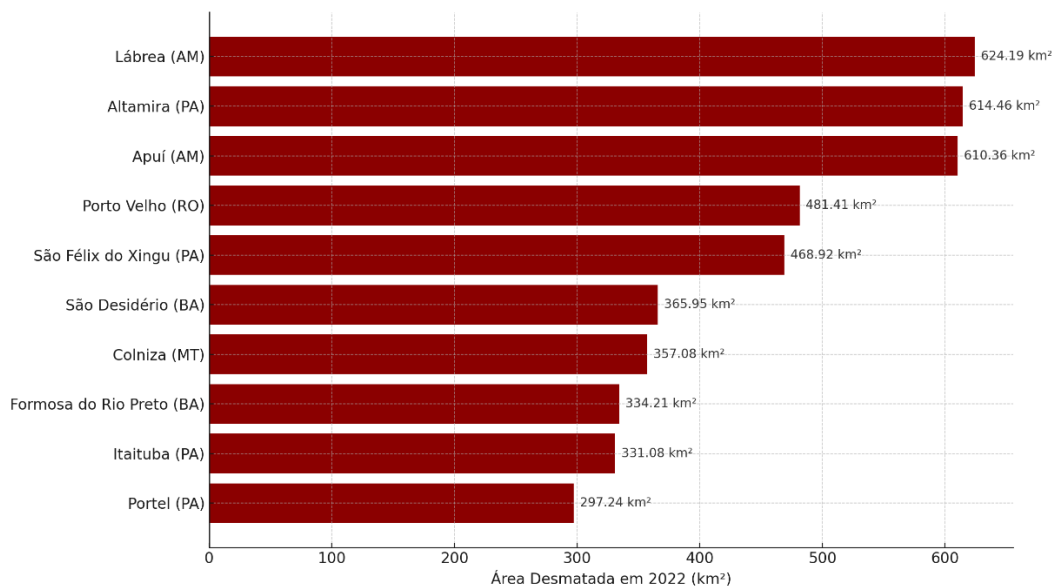
Fonte: MapBiomias (2022).

Do ponto de vista municipal, os municípios com maiores áreas desmatadas estão localizados nos estados que apresentam as maiores perdas de cobertura vegetal. De acordo com os dados do MapBiomias Alerta, todos os cinquenta municípios mais desmatados situam-se no bioma Amazônia, concentrando-se nos estados do Pará, Amazonas, Roraima, Bahia, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Maranhão e Acre. Essas áreas compreendem a região conhecida como Arco do Desmatamento da Amazônia, o oeste da Bahia e a localidade do Matopiba. Destacam-se, entre esses estados, o Pará, com quinze municípios, seguido pelo Amazonas e pela Bahia, ambos com sete municípios, e o Maranhão, com cinco.

Os dez municípios mais desmatados em 2021 (figura 4) foram: Altamira (638,40 km²), São Félix do Xingu (527,01 km²), Lábrea (493,45 km²), Porto Velho (491,73 km²), Novo Progresso (372,29 km²), Apuí (354,48 km²), Itaituba (301,74 km²), Colniza (226,56 km²), Portel (215,65 km²) e Humaitá (183,09 km²). Alguns desses municípios também

figuram entre os dez com maior número de cabeças de gado em 2021 e entre aqueles com as maiores áreas de lavouras permanentes e temporárias colhidas.

Figura 4 – Os dez municípios com maior área desmatada no Brasil em 2022 (em km²).



Fonte: Adaptado de MapBiomias Alerta (2023).

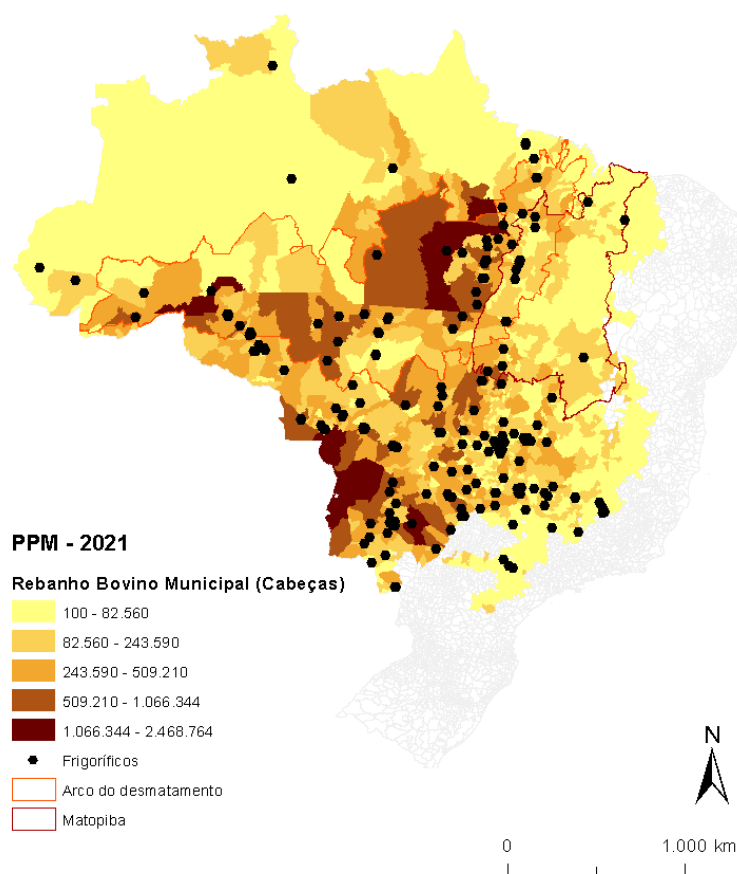
1.3 Estatísticas da agropecuária no Cerrado e Amazônia

Os mapas de distribuição municipal do rebanho bovino e das áreas colhidas (Figuras 5 e 6), elaborados a partir dos dados da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) e da Produção Agrícola Municipal (PAM) do IBGE, evidenciam, por meio de análise cartográfica, uma correlação clara entre as áreas com elevado número de bovinos e colheita e aquelas com alta taxa de desmatamento. Essa relação é particularmente visível em municípios como São Félix do Xingu (PA), que possui o maior rebanho bovino do Brasil, com 2.468.764 cabeças; Corumbá (MS), com 1.838.542 cabeças; Novo Repartimento (PA), com 1.155.609; Porto Velho (RO), com 1.353.947; e Altamira (PA), com 904.271 cabeças. Todos esses municípios também se destacam entre os que apresentam maiores áreas desmatadas.

A presença de frigoríficos nos municípios da Amazônia e Cerrado exerce influência significativa sobre as dinâmicas de uso da terra, especialmente no que se refere à expansão da pecuária e, conseqüentemente, ao desmatamento. Estudo realizado pelo Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon) e dados compilados pelo

MapBiomias indicam que grande parte dos municípios com elevados índices de desmatamento e rebanhos expressivos também concentram unidades frigoríficas ativas. Municípios como São Félix do Xingu (PA), Porto Velho (RO), Colniza (MT) e Altamira (PA) abrigam unidades industriais de abate que processam parte significativa do gado criado na região. A proximidade e a capacidade instalada desses frigoríficos geram uma demanda contínua por áreas de pastagem, estimulando a abertura de novas áreas por meio do desmatamento, muitas vezes em territórios legalmente protegidos. Além disso, a presença de grandes empresas do setor frigorífico, como JBS, Marfrig e Minerva, que operam em escala nacional e internacional, reforça a inserção desses municípios nas cadeias globais de carne bovina, ampliando as pressões sobre os ecossistemas locais. A relação entre frigoríficos, crescimento do rebanho e expansão do desmatamento reforça a necessidade de políticas públicas voltadas à rastreabilidade da produção e ao cumprimento de normas ambientais, visando à redução da degradação ambiental associada à atividade pecuária.

Figura 5: Distribuição municipal do rebanho bovino brasileiro – PPM/IBGE (2021).



Fonte: elaborado com base nos dados da PPM.

Tabela 4: 12 municípios com maior desmatamento e seu respectivo rebanho em 2021.

Município	Desmatamento (km²)	Rebanho Bovino (cabeças)
Altamira (PA)	638,40	904.271
São Félix do Xingu (PA)	527,01	2.468.764
Lábrea (AM)	493,45	328.300
Porto Velho (RO)	491,73	1.353.947
Novo Progresso (PA)	372,29	642.252
Apuí (AM)	354,48	168.000
Itaituba (PA)	301,74	342.732
Colniza (MT)	226,56	733.536
Portel (PA)	215,65	38.470
Humaitá (AM)	183,09	27.800
Novo Repartimento (PA)	114,16	1.155.609
Corumbá (MS)	106,95	1.838.542

Fonte: IBGE, PPM (2023); MapBiomias Alerta (2022).

Tabela 5 – 10 Municípios com maior rebanho bovino em 2021.

Município	nº de bovinos
Corumbá (MS)	1.838.542
Ribas do Rio Pardo (MS)	993.037
Cáceres (MT)	1.161.605
Juara (MT)	954.545
Altamira (PA)	904.271
São Félix do Xingu (PA)	2.468.764
Porto Velho (RO)	1.353.947
Marabá (PA)	1.478.450
Novo Repartimento (PA)	1.155.609
Vila Bela da Santíssima Trindade (MT)	1.066.344

Fonte: IBGE, PPM (2023).

Em relação às áreas colhidas de lavouras temporárias e permanentes, destaca-se o bioma Cerrado pela extensão de suas áreas cultivadas (figura 4). Em 2021, o Cerrado possuía aproximadamente 347.975 km² de lavouras temporárias, enquanto o bioma Amazônia registrava 104.037 km². Isso representa um crescimento de 128.824 km² (37%) em relação a 2010 no Cerrado e de 57.722 km² (55%) na Amazônia, evidenciando uma expansão significativa das áreas cultivadas em ambos os biomas. Ressalta-se, entretanto,

que a Amazônia apresentou um crescimento proporcionalmente superior, com aumento superior a 50% em uma década.

Em nível municipal, os maiores destaques concentram-se nos municípios do Cerrado, especialmente na região do MATOPIBA. São Desidério (BA), por exemplo, registrou uma área desmatada de 178,28 km² em 2021 e uma das maiores áreas de lavoura temporária, com 5.869,20 km². Outros municípios relevantes incluem Rio Verde (GO), e Sorriso, Campo Novo do Parecis, Sapezal e Diamantino, todos no estado do Mato Grosso. No bioma Amazônia, destacam-se Nova Ubitatã e Querência, ambos localizados no Mato Grosso. Juntos, os biomas Cerrado e Amazônia somam 452.013 km² (56%) de toda a área de lavouras temporárias do Brasil.

Tabela 6– Municípios com maior área de lavoura temporária (2010 e 2021).

UF	Município	2010 (km ²)	2021 (km ²)
MT	Sorriso	8.758,39	12.185,91
GO	Rio Verde	4.211,60	8.265,45
MT	Campo Novo do Parecis	5.088,80	7.589,32
MT	Sapezal	5.768,17	7.330,62
MT	Diamantino	4.232,84	7.397,12
BA	São Desidério	4.369,22	5.869,20
MT	Nova Ubitatã	3.493,56	7.397,12
MT	Querência	2.410,08	6.435,67
MS	Maracaju	3.512,89	5.618,43
BA	Formosa do Rio Preto	3.498,22	5.484,33

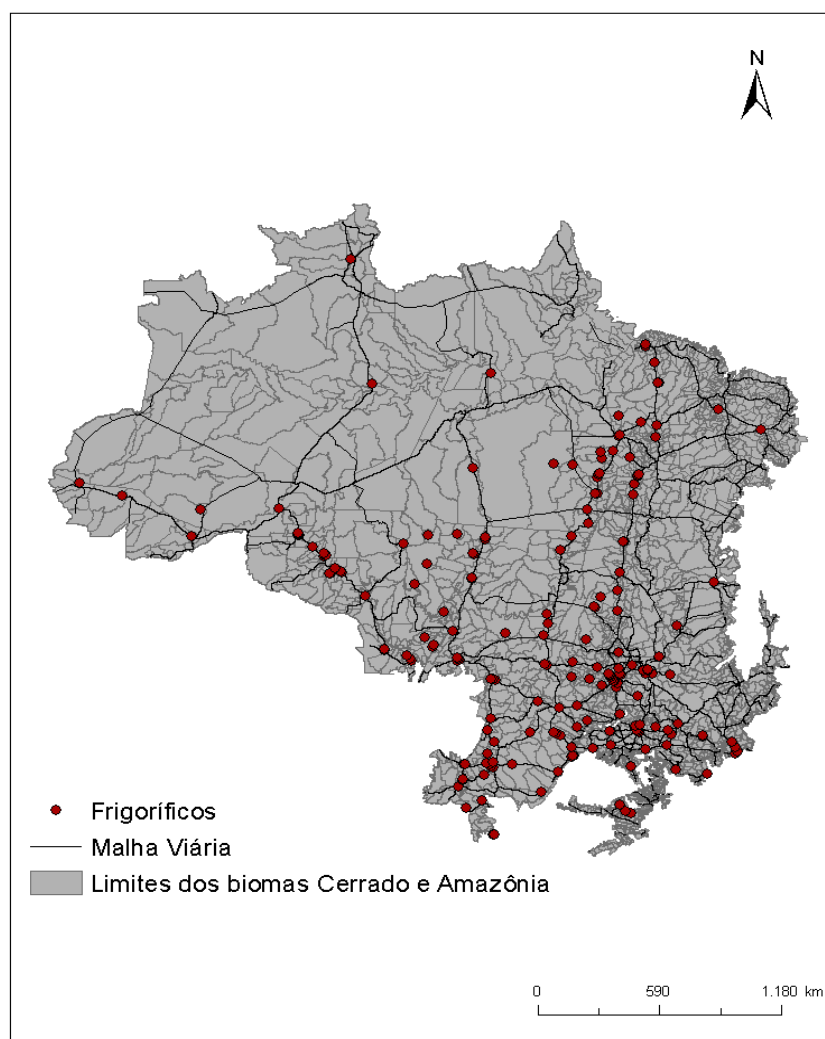
Fonte: IBGE, PAM (2010; 2021).

No que se refere às áreas colhidas de lavouras permanentes, destaca-se o bioma Amazônia, com 7.923,79 km², frente ao Cerrado, que registrou 7.285,67 km². Apesar da proximidade dos números totais, em escala municipal observa-se que os municípios com maiores áreas colhidas se encontram na Amazônia, especialmente no estado do Pará. Entre eles destacam-se: Tailândia (618,30 km²), Medicilândia (508,35 km²) e Igarapé-Miri (526,92 km²). No bioma Cerrado, os municípios com maiores áreas de lavouras permanentes são: Patrocínio (423,26 km²), Pedregulho (177,70 km²) e Serra do Salitre (173,62 km²).

Destaca-se, ainda, que Altamira (72,77 km²), com elevadas taxas de desmatamento e rebanho bovino, também figura entre os trinta com maiores áreas colhidas de lavoura permanente, ao lado de Novo Repartimento (61,92 km²) e São Félix do Xingu (55,99 km²). Esse cenário evidencia o papel central da agropecuária na expansão territorial e na apropriação de novas áreas na região amazônica, incluindo a implantação de frigoríficos (Figura 6).

O bioma Cerrado concentra o maior número de frigoríficos do Brasil, sendo historicamente um dos mais explorados pela agropecuária. Responsável por grande parte da produção e exportação de carne bovina do país, os frigoríficos localizam-se majoritariamente na região Centro-Oeste, com destaque para os estados de Goiás e Minas Gerais (Figura 6).

Figura 6: Espacialização dos frigoríficos na Amazônia e Cerrado.



Fonte: Atlas das pastagens, 2023.

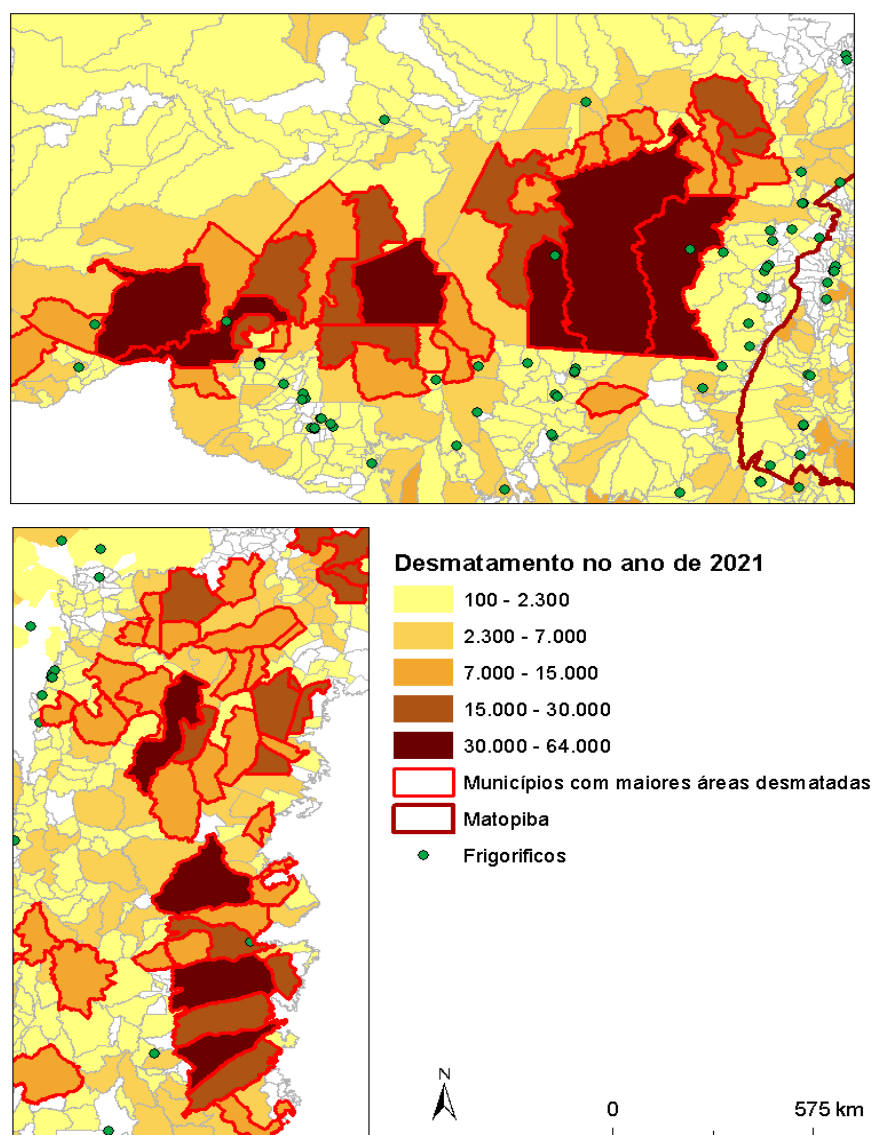
Tabela 8 – Municípios com maior área de lavoura permanente (2010 e 2021).

UF	Município	2010 (km ²)	2021 (km ²)
PA	Tailândia	202,12	618,30
PA	Medicilândia	296,40	508,35
PA	Igarapé-Miri	5,60	526,92
PA	Tomé-Açu	95,85	459,24
MG	Patrocínio	304,55	423,26
PA	Cametá	60,53	371,20
PA	Moju	163,23	352,30
PA	Acará	106,70	231,19
PA	Abaetetuba	6,35	226,60
PA	Concórdia do Pará	30,86	218,05

Fonte: MapBiomias (2022).

Dados sobre frigoríficos no Brasil, compilados pelo Atlas das Pastagens (2022), indicam que 57% dessas unidades estão localizadas nos biomas Cerrado (160 frigoríficos) e Amazônia (88 frigoríficos). A distribuição espacial dessas unidades industriais apresenta forte correlação com as áreas de maior desmatamento, conforme evidenciado em 2021 (Figura 7). Observa-se que diversos municípios com altos índices de rebanho bovino e desmatamento também se destacam pela proximidade com frigoríficos, como é o caso de São Félix do Xingu e Novo Progresso, ambos situados no sudeste do Pará, e Porto Velho, no estado de Rondônia. Essa concentração territorial de frigoríficos nas regiões mais desmatadas reforça a importância de se considerar a estrutura industrial no contexto das políticas ambientais, dado o estímulo à expansão de áreas de pastagem para atender à demanda do setor.

Figura 7: Municípios com maiores áreas desmatadas em 2021 e localização de frigoríficos



Analisando a espacialização, conseguimos perceber que a malha viária também influencia fortemente a localização dos frigoríficos, que estão sempre próximos as principais rodovias, para facilitar a exportação de carne (nível estadual e internacional). Destaca-se que os oito principais estados que exportaram carne no ano de 2021 estão no Cerrado e Amazônia (Tabela 9), somando mais de 90% de toda exportação de carne bovina, sendo estes São Paulo (24,48%), Mato Grosso (21,62%) e Goiás (11,63%) (ABIEC, 2022).

Tabela 9: Exportações por unidade da federação.

UF	Ton.	US\$	PM (US\$/ton)
SP	554.324	3442 Mi	6,21
MT	489.503	2791 Mi	5,7
GO	263.332	1482 Mi	5,63
MG	233.385	1358 Mi	5,82
MS	217.309	1133 Mi	5,21
RO	169.301	868 Mi	5,13
PA	111.704	649 Mi	5,81
TO	103.254	587 Mi	5,69
RS	83.177	447 Mi	5,37
PR	18.738	90 Mi	4,81
MA	7.217	29 Mi	3,96
BA	4.045	18 Mi	4,47
RJ	2.811	53 Mi	18,93
ES	2.493	13 Mi	5,2
SC	1.904	8 Mi	4,11
AC	1.236	3 Mi	2,25
RR	416	1 Mi	1,38
AL	15	0 Mi	8,36
CE	9	0 Mi	8,52
AM	3	0 Mi	8,95
PE	2	0 Mi	10,77
AP	1	0 Mi	10,67

Fonte: ABIEC (2022).

A transformação em áreas antrópicas, como pastagens, lavouras, garimpos ou áreas urbanas, é uma das principais razões para a diminuição das áreas de vegetações naturais dos biomas. Além de ser uma das motivações para os incêndios e desmatamentos ilegais, pois funciona como uma reserva de terras, onde geralmente o primeiro uso dessas terras são pra pastagens (PARENTE et al., 2019).

1.4 Mudanças de uso e cobertura da Terra

Segundo dados do MapBiomas (2022) sobre o uso e cobertura da terra em ambos os biomas, o uso antrópico com maior área em 2021 é a pastagem, ocupando 1.020.155,19 km². Esses valores estão distribuídos entre 470.974,49 km² de pastagens no bioma Cerrado, enquanto a Amazônia registra 549.180,70 km² em 2021 (Tabela 10). Esse valor equivale a 67% de todas as áreas com pastagens no Brasil, que totalizam 1.511.423,81 km².

Na última década, as áreas de pastagens se expandiram significativamente na Amazônia. Entre 2001 e 2021, houve um acréscimo de 139.911,45 km² de áreas de pastagens no bioma. Por outro lado, o Cerrado sofreu uma perda de 53.143,77 km² no mesmo período, sendo essa área incorporada pela agricultura (Figuras 8 e 9).

Um dos fatores responsáveis por esse fenômeno foi o boom do mercado mundial de commodities, ocorrido principalmente entre os anos de 2000 e 2014. Nos anos de 2006 e 2008, por exemplo, os preços internacionais das commodities alimentares aumentaram 60%, enquanto os preços dos grãos dobraram (IPEA, 2016). Além disso, é necessário que o produtor esteja sempre atualizado sobre as modernizações da pecuária, caso contrário, enfrentará dificuldades para manter sua produção (MACEDO, 2006).

Tabela 10: Quantificação do uso e cobertura da terra dos Biomas Cerrado e Amazônia em hectares – MapBiomas (2022).

Uso/Cobertura	Amazônia (km ²)			Cerrado (km ²)		
	2001	2011	2021	2001	2011	2021
Formação Florestal	3.513.922,97	3.377.319,53	3.314.562,39	988.661,19	927.054,00	885.442,36
Agricultura	9.931,81	36.223,88	69.965,75	130.333,09	197.386,45	254.871,21
Pastagem	409.269,25	519.074,26	549.180,70	524.118,26	515.568,67	470.974,49
Área urbanizada	3.308,21	4.232,97	5.877,78	13.133,15	13.842,27	15.117,23
Corpo d'água	103.197,67	104.419,46	102.754,70	13.008,08	15.384,70	13.340,01
Silvicultura	1.827,16	2.630,12	3.745,01	13.244,74	20.827,69	32.241,38
Mosaico de usos	-	-	-	120.011,37	119.290,58	143.426,27

Fonte: MapBiomas (2022).

Figura 8: Mapas de uso e cobertura da terra do bioma Cerrado para os anos 2000, 2010 e 2021 (MapBiomas, 2022).

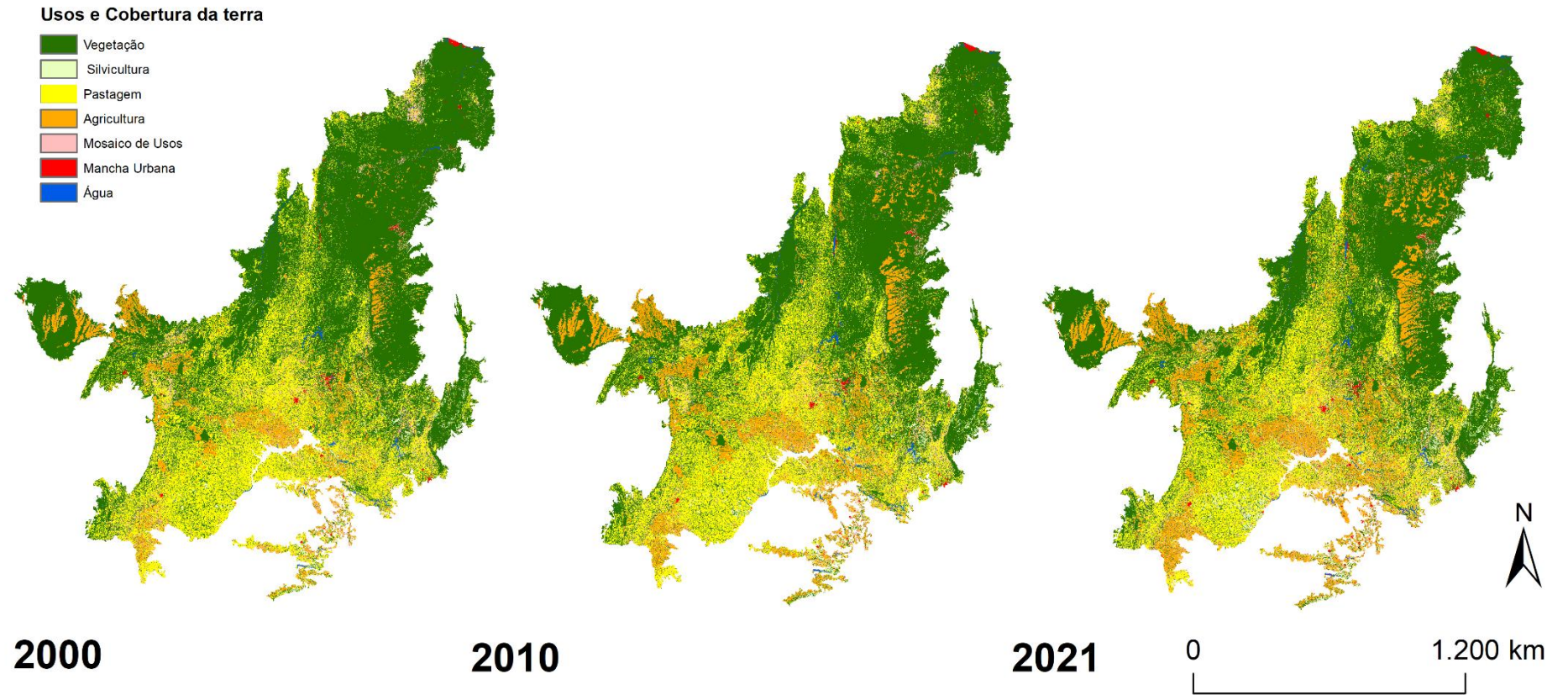
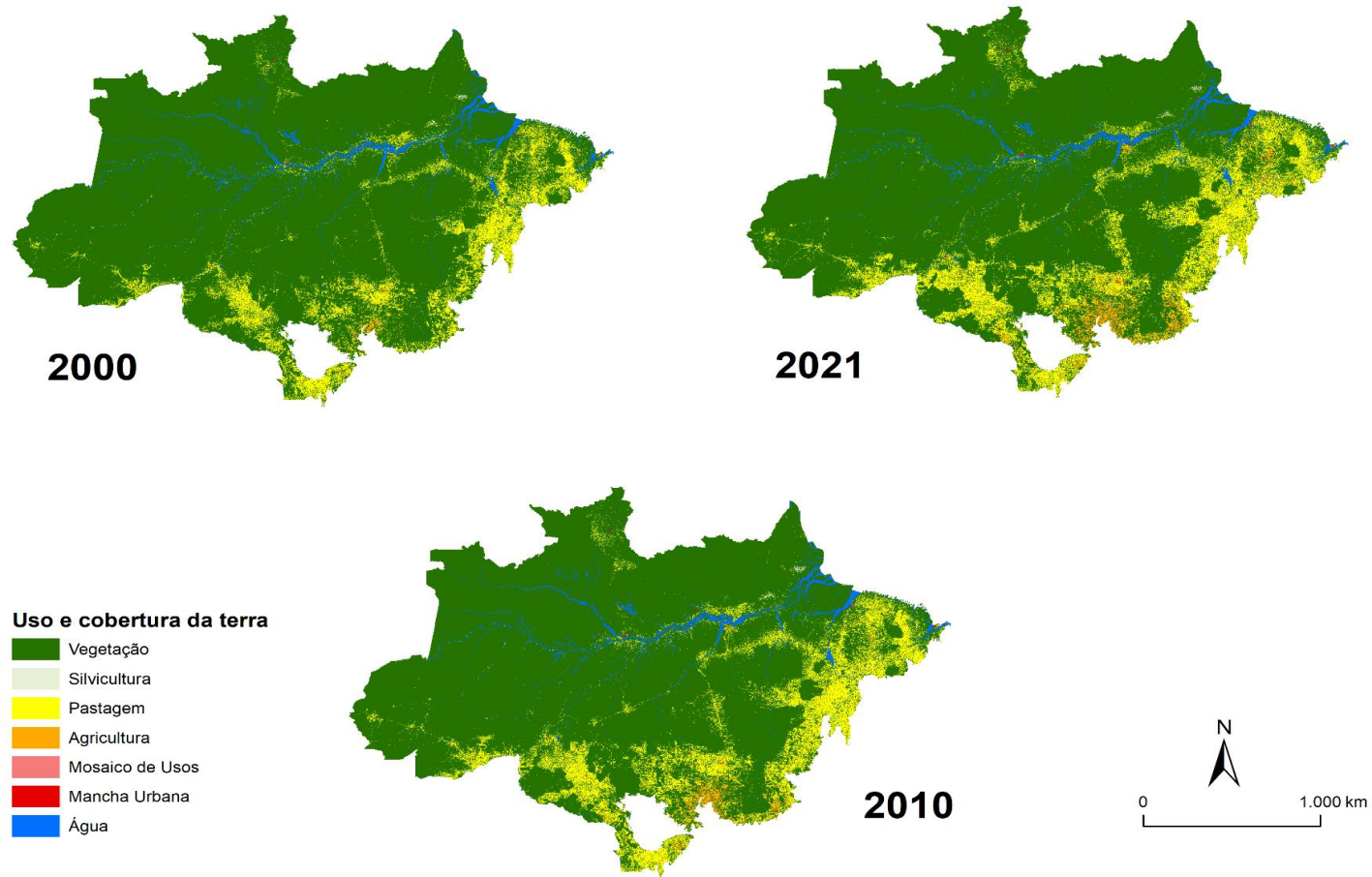


Figura 10: Mapas de uso e cobertura da terra do bioma Amazônia para os anos 2000, 2010 e 2021 (MapBiomias, 2022).



A agricultura é um dos usos antrópicos que mais se expandiu nos últimos vinte anos. Na Amazônia, sua área passou de 9.931,81 km² em 2001 para 69.965,75 km² em 2021, um crescimento de 60.033,94 km², com a área aumentando aproximadamente sete vezes. O Cerrado, desde 2001, já possuía grandes áreas dedicadas à agricultura (130.333,09 km²). No entanto, no período entre 2001 e 2021, registrou-se um crescimento vertiginoso, totalizando em 2021 254.871,21 km² ocupados por lavouras, um acréscimo de 124.538,12 km², mais que o dobro do ganho da Amazônia (MAPBIOMAS, 2022).

A expansão urbana na Amazônia, entre 2001 e 2021, foi de 2.569,57 km². As áreas urbanas, que ocupavam 3.308,21 km² em 2001, passaram a ocupar 5.877,78 km². No Cerrado, a expansão urbana foi de 1.984,08 km², passando de 13.133,15 km² em 2001 para 15.117,23 km² em 2021.

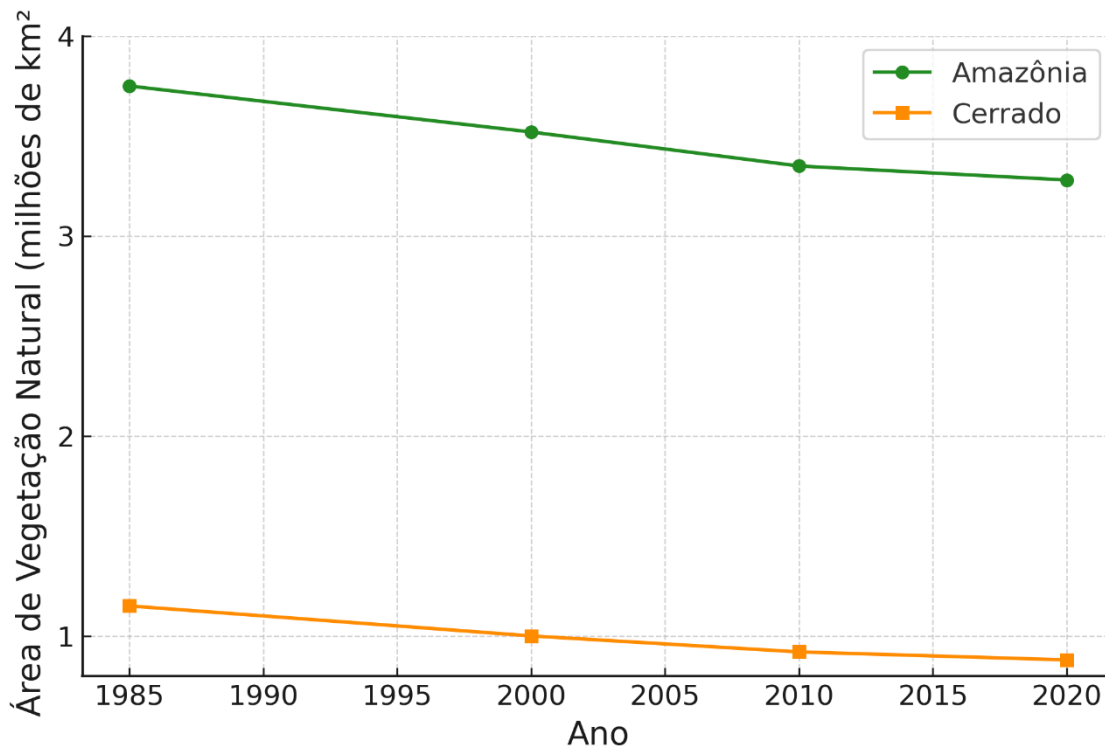
As áreas de silvicultura cresceram apenas 1.917,85 km² na Amazônia entre 2001 (1.827,16 km²) e 2021 (3.745,01 km²), um valor pouco expressivo se comparado ao Cerrado, onde as áreas de silvicultura passaram de 13.244,74 km² em 2001 para 32.241,38 km² em 2021, uma expansão de 18.996,64 km².

Neste cenário, considerando a expansão dos usos antrópicos mapeados em ambos os biomas, entre 1985 e 2021, a Amazônia já perdeu 441.479,88 km² de sua vegetação natural. Os dados mais antigos disponíveis mostram que, em 1985, sua área de cobertura natural era de 3.756.042,27 km². Dessa forma, 45% da cobertura natural convertida para uso antrópico ocorreu entre 2001 e 2021, período no qual 199.360,58 km² foram suprimidos (Figura 10).

O Cerrado, em 1985, tinha 1.137.213,98 km² de sua vegetação natural preservada. Dessa área, 251.771,62 km² foram convertidos até 2021, ano em que a área de vegetação passou a ser 885.442,36 km². Logo, 41% da área perdida de vegetação ocorreu entre 2001 e 2021, cerca de 103.218,83 km² (Figura 10). Ambos os biomas juntos perderam 302.579,41 km² nos últimos vinte anos, grande parte dessas áreas destinada à agropecuária.

As áreas de vegetação não foram as únicas áreas naturais dos biomas a diminuir. Os corpos d'água na Amazônia tiveram uma redução de 442,97 km² entre 2001 e 2021. Segundo Souza et al. (2019), isso ocorre devido às alterações no regime de chuvas, mas também pelo desmatamento, uso do solo e pela realização indiscriminada de obras de infraestrutura, como, por exemplo, barragens para a produção de energia. O Cerrado, no mesmo período, teve uma diminuição de 331,93 km² em seus corpos d'água, sendo essas reduções geralmente causadas como um dos impactos do desmatamento.

Figura 10: Diminuição da Vegetação Natural na Amazônia e no Cerrado (1985 – 2022).



Fonte: MapBiomas (2022).

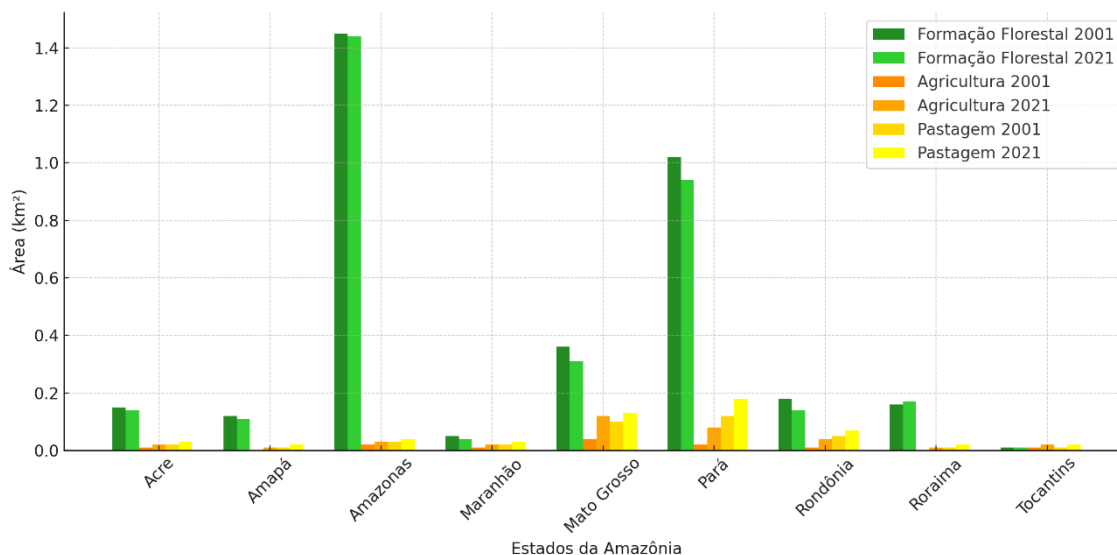
Observando os biomas em escala estadual, é possível identificar com maior precisão quais áreas estão sofrendo conversão mais intensa ao longo da década entre 2001 e 2021, possibilitando a identificação de possíveis fronteiras agrícolas. Em relação à expansão de pastagens na Amazônia, os estados com maiores áreas em 2021 são o Pará, com 208.018,99 km², o que equivale a 38% de toda a pastagem do bioma. Sua área em 2011 era de 140.428,78 km², resultando em uma expansão de 67.590,21 km² (Figura 11 e 12).

O Pará também abriga os municípios com maiores números de bovinos e culturas permanentes, além de extensas áreas desmatadas, como, por exemplo, Altamira e São Félix do Xingu. O segundo estado com maiores áreas de pastagem é o Mato Grosso, com 130.431,29 km² (24%), apresentando um crescimento de 8.274,30 km² entre 2001 e 2021. Este estado também se destaca como o segundo maior exportador de carne, com o município de Cáceres possuindo um rebanho bovino de 1.161.605 cabeças.

O terceiro estado é Rondônia, que teve o segundo maior crescimento, equivalente a 29.555,53 km² de área de pastagens entre 2001 e 2021, registrando em 2021 uma área total de 86.172,60 km², sendo o sexto estado que mais exporta carne bovina. Em Rondônia, o município de Porto Velho se destacou em 2021 entre os mais desmatados,

com 491,73 km², além de possuir o maior rebanho bovino do estado, totalizando 1.353.947 cabeças.

Figura 11: Comparativo do Uso da Terra por Estado Amazônia (2001 vs. 2021)



Fonte: MapBiomas (2022)

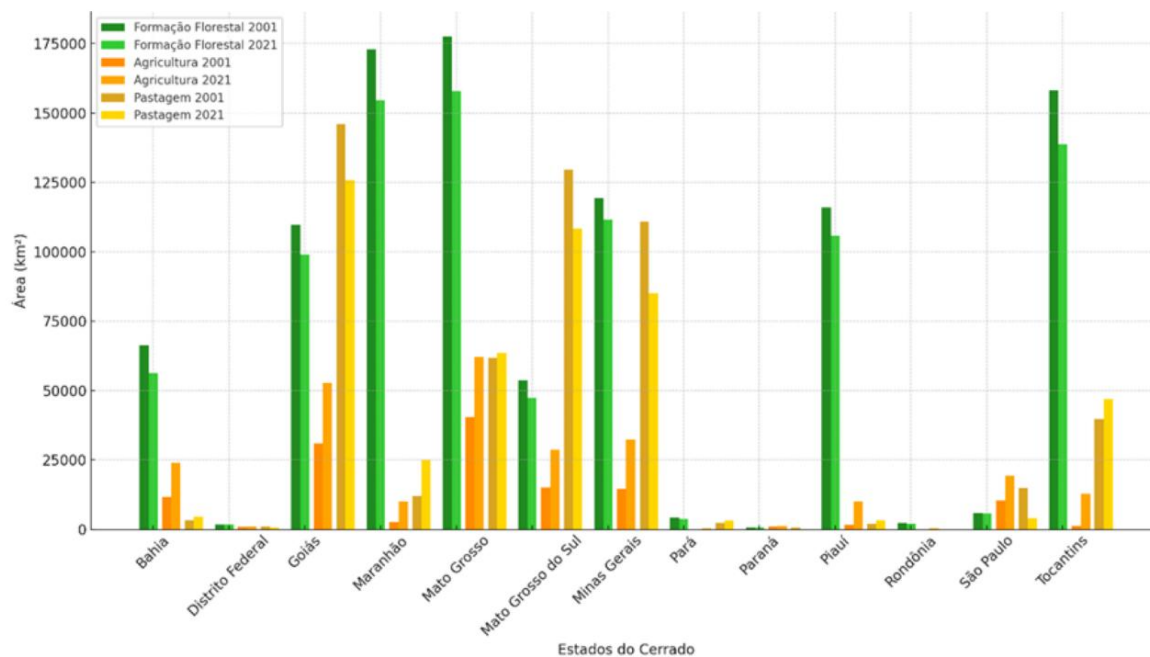
No Cerrado, os estados com maiores áreas de pastagem ao longo dos últimos dez anos vivenciaram uma redução de área (Figura 12). Goiás, destaque na pecuária, apresentou uma redução de 20.277,36 km² em pastagens, passando a ter uma área de 125.771,32 km² em 2021, o que corresponde a 27% da área de pasto do Cerrado.

Mato Grosso do Sul é o segundo estado com maiores áreas de pastagens, com 108.475,51 km² em 2021 (23%). Entre 2001 e 2021, o estado perdeu 21.065,15 km² de pastagem. Um dos municípios que se destaca no estado é Ribas do Rio Pardo, que possui um dos maiores rebanhos bovinos, com cerca de 993.037 cabeças. Por sua vez, Minas Gerais é o terceiro estado com maior área ocupada por pastagens, totalizando 85.014,59 km². Entre 2001 e 2021, foi o estado que apresentou a maior redução em área de pastagens, com cerca de 25.806,47 km² convertidos para outros usos.

No que se refere às áreas de agricultura, o estado do Mato Grosso se destaca em ambos os biomas. Na Amazônia, representa 76% (53.351,98 km²) de todas as áreas agrícolas, com um crescimento de 45.161,75 km² entre 2001 e 2021, destacando-se os municípios de Sorriso (12.185,91 km²) e Campo Novo do Parecis (7.589,32 km²) pelas áreas de lavouras temporárias. Suas áreas localizadas no Cerrado representam 24% (62.159,25 km²), com um crescimento de 21.683,58 km² em relação a 2001. Na

Amazônia, também se destaca o Pará, ocupando 13% (9.294,64 km²), com um aumento de 7.889,60 km² entre 2001 e 2021.

Figura 12: Comparativo do Uso da Terra por Estado do Cerrado (2001 vs. 2021).



Fonte: MapBiomias (2022).

O estado de Goiás é responsável por 20% das áreas de agricultura do Cerrado, ocupando uma área de 52.738,47 km² em 2021, um aumento de 21.797,94 km² em relação a 2001. Também é onde se localiza o município de Rio Verde, que possui a segunda maior área de lavouras temporárias, com 8.265,45 km² em 2021. Por fim, o estado de Minas Gerais possui 32.430,44 km², equivalendo a 12% das áreas agrícolas do Cerrado, com um crescimento de 17.820,42 km² entre 2001 e 2021.

Em relação à diminuição das áreas de vegetação, os estados que perderam as maiores extensões são também os que apresentaram maior desmatamento e crescimento agropecuário no mesmo período (2001–2021). Entre eles, na Amazônia, destaca-se o estado do Pará, com uma redução de 77.616,89 km². Em seguida, o estado do Mato Grosso, com uma perda de 54.007,07 km² no mesmo intervalo. Em terceiro lugar está Rondônia, com 33.084,93 km² suprimidos.

No Cerrado, as áreas de vegetação sofreram uma supressão menor do que na Amazônia, principalmente porque suas áreas de cobertura natural já vinham sendo

intensamente desmatadas desde a década de 1970. Nesse contexto, o estado do Mato Grosso foi o que registrou a maior diminuição, perdendo 19.681,29 km² entre 2001 e 2021. Em seguida, vem o estado do Tocantins, com uma redução de 19.525,50 km², e o Maranhão, com uma perda de 18.321,59 km², ambos no mesmo período.

Na Amazônia, os estados que apresentaram o maior crescimento da mancha urbana entre 2001 e 2021 são os mesmos que possuem as maiores áreas urbanizadas em 2021. São eles: o Pará, com um crescimento de 1.564,17 km², mais do que o dobro da área registrada em 2001 (1.121,42 km²); o Mato Grosso, com um aumento de 333,37 km²; e Rondônia, com um crescimento de 184,00 km² no mesmo período.

No Cerrado, os estados que tiveram um crescimento significativo do perímetro urbano no período analisado foram: Minas Gerais, com 526,17 km²; Goiás, com 468,21 km²; e Maranhão, com 184,12 km².

1.5 As unidades de conservação dos biomas Cerrado e Amazônia

A dinâmica da apropriação das terras na Amazônia e no Cerrado tem como um dos principais vetores a agropecuária, que se expandiu de forma significativamente rápida nos últimos dez anos e, segundo o MapBiomias Alerta, é também um dos principais fatores de pressão sobre o desmatamento, correspondendo a 97% de todos os desmatamentos validados em 2021. A pressão do garimpo é de 0,5% e está concentrada principalmente em algumas áreas do estado do Pará.

Dessa forma, percebe-se que a expansão da agropecuária está sinergicamente ligada ao aumento das áreas de desmatamento. Esse crescimento acelerado tem afetado as áreas protegidas na Amazônia e no Cerrado. Em todo o Brasil, 252 Unidades de Conservação (UCs) registraram desmatamento em 2021, correspondendo a 10,1% do desmatamento total. Na Amazônia, esse percentual foi de 12,6%, e no Cerrado, de 7,1%, sendo estes os dois biomas com maior desmatamento em UCs.

As UCs são essenciais para a conservação da diversidade biológica e sociocultural, desempenhando papéis fundamentais nas regiões, como a provisão de água, regulação do clima regional, controle de inundações e erosões, e controle biológico (Álvarez-Malvido, 2021). Dessa forma, segundo a Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB), é estipulado que cada bioma possua pelo menos 10% de sua área protegida por UCs, o que, no entanto, não se verifica em todos os biomas brasileiros.

O bioma Cerrado, historicamente submetido a uma ocupação acelerada, influenciada por políticas públicas e programas governamentais com o intuito de

fortalecer sua economia, teve a importância de sua conservação frequentemente negligenciada. Atualmente, apenas 9,4% de sua extensão está protegida por UCs, sendo 2,9% de proteção integral e 6,5% de uso sustentável (IBAMA, 2009).

O bioma Amazônia foi submetido a uma ocupação mais lenta, com um período de aceleração entre 2018 e 2022. No entanto, sua legislação é mais rígida, proporcionando maior proteção: 28,5% de sua área está protegida por UCs, das quais 63,5% são de uso sustentável e 36,5% de proteção integral.

Ao sobrepor os dados de áreas protegidas e de uso e cobertura da terra em 2021 (Figura 12), observa-se que essa conversão/desmatamento já afeta e pressiona as Terras Indígenas e as UCs, o que pode resultar no recrudescimento de conflitos territoriais na região. Também é possível identificar que as áreas de proteção com maior número de alertas de desmatamento, segundo o MapBiomias (Tabela 15), estão localizadas nos biomas Cerrado e Amazônia.

Tabela 15: Lista das Unidades de Conservação com maior área desmatada na Amazônia e Cerrado em 2021.

Unidades de Conservação	UF	Número de alertas	Área desmatada (km²)
Área De Proteção Ambiental Triunfo Do Xingu	PA	653	489,71
Floresta Nacional Do Jamanxim	PA	152	182,81
Área De Proteção Ambiental Do Rio Preto	BA	101	141,34
Reserva Extrativista Jaci-Paraná	RO	191	95,88
Área De Proteção Ambiental Ilha Do Bananal/Cantão	TO	63	50,14
Parque Estadual De Guajará-Mirim	RO	122	46,81
Estação Ecológica Da Terra Do Meio	PA	80	36,08
Área De Proteção Ambiental Bacia Do Rio De Janeiro	BA	12	29,71

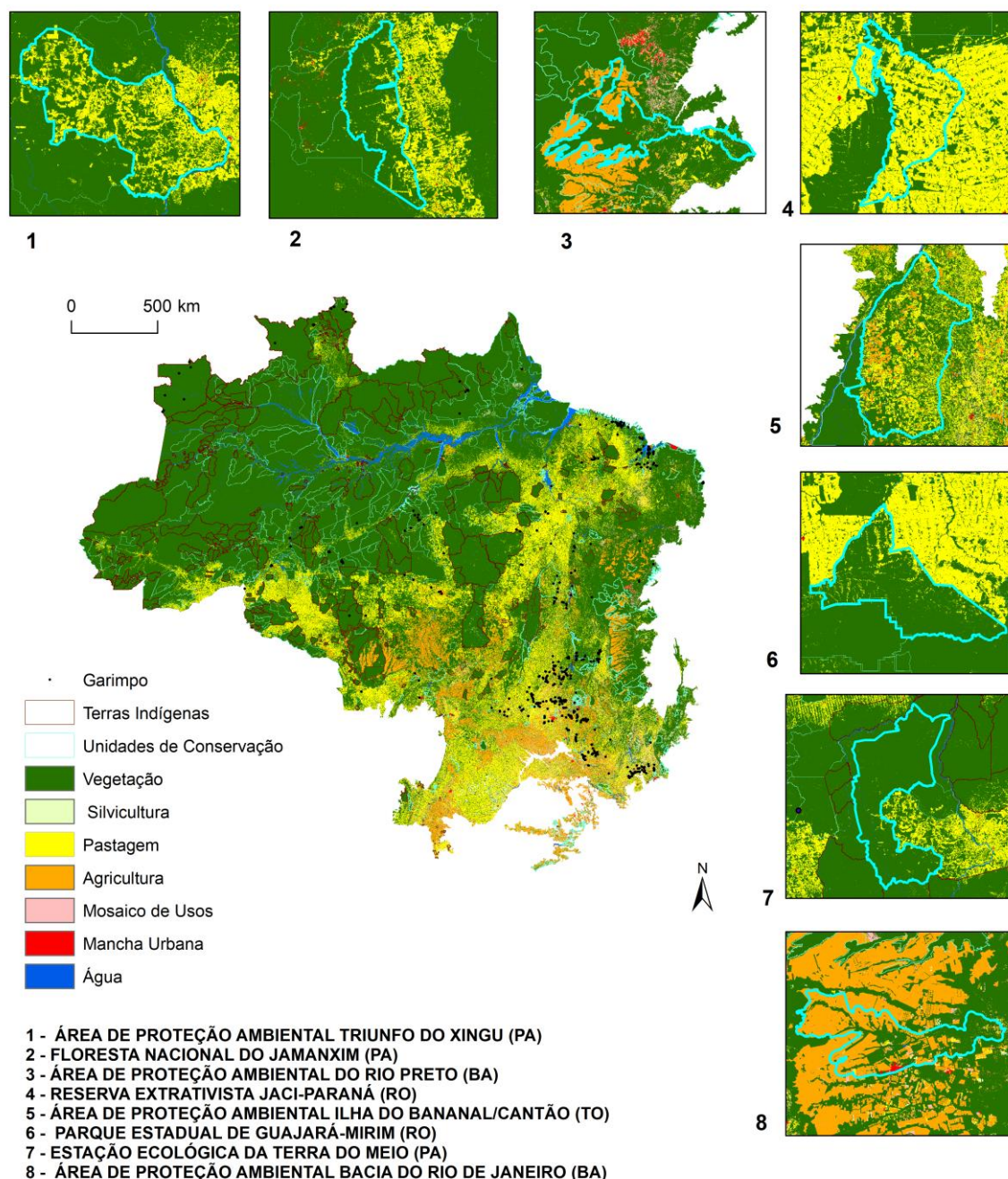
Fonte: MapBiomias Alerta.

A Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu, localizada no estado do Pará, teve a maior área desmatada, com 489,71 km². Em seguida, destaca-se a Floresta Nacional do Jamanxim, também no Pará, com 182,81 km² desmatados, ambas situadas no bioma Amazônia. No Cerrado, a Unidade de Conservação mais desmatada foi a Área de Proteção Ambiental do Rio Preto, na Bahia, com 141,34 km², seguida pela Reserva Extrativista Jaci-Paraná, em Rondônia, com 95,88 km².

Também é possível observar no mapa (Figura 12) que essas UCs, além de apresentarem grandes áreas desmatadas em 2021, estão sob forte pressão de usos antrópicos, especialmente da agropecuária. As quatro UCs mais desmatadas já possuem,

em seus limites, extensas áreas ocupadas por pastagens e agricultura. Apenas a Estação Ecológica da Terra do Meio ainda não apresenta grandes áreas de pastagem ou agricultura em seu interior; contudo, ela também já sofre pressão externa em seus arredores, principalmente de áreas destinadas à pastagem.

Figura 12: Mapa de UCs e uso e cobertura na Amazônia e Cerrado.



Fonte: MapBiomas Alerta.

A Área de Proteção Ambiental Triunfo do Xingu, localizada no município de São Félix do Xingu, no Pará, exemplifica a sinergia entre a forte pressão antrópica sobre o

território e a vulnerabilidade das Unidades de Conservação. Em 2021, essa UC destacou-se como a mais afetada pelo desmatamento, refletindo a intensa conversão do solo observada no município.

Apesar do aumento do desmatamento e do uso antrópico nas UCs da Amazônia nos últimos anos, essas unidades ainda desempenham um papel essencial na contenção da degradação ambiental. Em comparação com outros biomas, especialmente o Cerrado, as UCs amazônicas têm se mostrado mais resilientes frente às pressões ambientais. Estima-se que metade da Floresta Amazônica remanescente esteja protegida por UCs, e entre 2001 e 2019, apenas 3,4% dessas áreas foram atingidas por incêndios, o que corresponde a 1,7% do total das áreas queimadas no bioma. Por outro lado, no Cerrado, cerca de 60% das UCs foram afetadas por queimadas, sendo que quase 60% dos incêndios de alto impacto ocorreram dentro dessas unidades (OLIVEIRA, 2022).

Esses dados reforçam a importância das Unidades de Conservação como barreiras fundamentais ao avanço da degradação, sobretudo na Amazônia, onde, apesar dos desafios, elas continuam exercendo um papel crucial na preservação da biodiversidade e na mitigação de impactos ambientais. No Cerrado, por sua vez, os elevados índices de queimadas e desmatamento dentro das UCs apontam para a necessidade urgente de fortalecimento das políticas de proteção e fiscalização, visando garantir a efetividade dessas áreas na conservação dos ecossistemas.

1.6 Modelagens de cenários futuros da Amazônia e do Cerrado

As modelagens espaciais e as projeções de cenários futuros tornaram-se cada vez mais presentes na literatura científica, sobretudo para identificar tendências de ocupação do solo e apoiar a formulação de políticas públicas (Uruña, 2019). Projeções de mudanças no uso e cobertura da terra são úteis para cientistas, gestores e demais partes interessadas que buscam compreender os efeitos dessas mudanças em questões sociais e ecológicas (TL Sohl et al., 2016). Ao permitir a visualização de paisagens futuras, os cenários auxiliam o planejamento territorial ao considerar possíveis impactos em processos ecológicos e sociais (Heistermann et al., 2006).

A dinâmica da paisagem pode ser modelada por técnicas de autômatos celulares, lógica fuzzy e inteligência artificial – incluindo redes neurais e sistemas multiagentes – integradas a Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Essa combinação possibilita a detecção de padrões e tendências espaciais (Paegelow & Camacho, 2008; Lima et al., 2013). Entre os softwares disponíveis, destacam-se o Dinâmica EGO, de uso gratuito,

mantido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR/UFMG); o LuccME, desenvolvido pelo INPE em 2012; e o módulo Land Change Modeler, integrante do software comercial TerrSet.

O Dinâmica EGO permite a modelagem espacial a partir de mapas de uso e cobertura obtidos por classificação de imagens digitais e utiliza variáveis espaciais agrupadas em dois subconjuntos – dinâmico e estático – conforme a sua natureza (Soares Filho et al., 2002).

O LuccME é uma estrutura de código aberto que descreve a evolução dos padrões espaciais ao longo do tempo, quantificando direcionadores e alocando a demanda de mudança de acordo com o potencial de cada célula (INPE, 2012).

Já o Land Change Modeler processa modelos com base em redes neurais (similaridade ponderada por instância – SimWeight), regressão logística (RL) ou rede neural perceptron multicamada (MLP) (Eastman, 2016).

Além dos softwares especializados, linguagens de programação como Python e R têm desempenhado um papel crescente na modelagem de cenários futuros de uso e cobertura da terra, sobretudo pela flexibilidade e potencial de integração com bibliotecas geoespaciais. Python tem sido amplamente adotado para implementar modelos baseados em Cadeias de Markov e Autômatos Celulares, como o proposto por alamanos (2023), destacando-se pela compatibilidade com bibliotecas como GDAL, rasterio e scikit-learn, que facilitam a manipulação de dados espaciais e a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina. De forma complementar, R oferece um ecossistema robusto para análises estatísticas e geográficas, sendo utilizado em estudos como o de Mallick et al. (2021) para prever mudanças no uso da terra em regiões tropicais, por meio de pacotes como "raster" e "sp". A utilização dessas linguagens permite maior personalização dos modelos e controle analítico, potencializando a capacidade preditiva das modelagens espaciais e ampliando seu uso em pesquisas voltadas à compreensão das dinâmicas territoriais e à formulação de políticas ambientais.

Entre os modelos de projeção vigentes, há grande variabilidade de estruturas de cenários, focos temáticos, escalas espaciais e metodologias. Mesmo assim, algumas arquiteturas tornaram-se consolidadas e amplamente replicadas na literatura.

O INPE-EM (Emissões de Gases de Efeito Estufa por Mudança de Uso e Cobertura da Terra) é o sistema desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais para estimar anualmente as emissões brasileiras de GEE associadas às alterações na cobertura e uso da terra. O modelo combina três componentes principais —

(1) desmatamento por corte raso, (2) dinâmica da vegetação secundária e (3) degradação florestal —, permitindo representar os processos de emissão de forma integrada e espacialmente explícita (ASSIS et al., 2022). A partir da integração de dados dos programas PRODES, DETER e MapBiomass, o INPE-EM fornece uma das bases técnicas mais robustas para o monitoramento contínuo das emissões do setor de uso da terra, contribuindo diretamente para a avaliação do cumprimento das metas brasileiras de redução de CO₂ equivalente.

Focado em fogo, o HESFIRE combina dinâmica vegetação–fogo a modelos estatísticos, representando incêndios de vários dias em passos de 12 h, com módulos de ignição, propagação e extinção (Le Page et al., 2017; 2015).

O Modelo Espacial Autorregressivo (SAR), por sua vez, estima impactos de incêndio a partir de uso da terra, cargas de combustível, fontes naturais de ignição e clima, utilizando matriz de vizinhança ponderada de oito células (Tiefelsdorf et al., 1999; Oliveira et al., 2022).

Soares Filho et al. (2006) estruturaram dois cenários para a Amazônia Legal: *business as usual* (BAU), que mantém a trajetória histórica de desmatamento, e governança (GOV), que assume aplicação rigorosa da legislação ambiental, licenciamento satelital e expansão de áreas protegidas. No BAU, a floresta densa cairia para 3,2 milhões km² (53 % da área original) em 2050; no GOV, 4,5 milhões km² permaneceriam conservados.

Além disso, é importante ressaltar que as mudanças de uso e cobertura da terra estão sinergicamente ligadas à sustentabilidade e são fatores essenciais na mediação da sociedade e do ambiente. O desmatamento raso, que consiste em a floresta ser substituída por outro uso, por exemplo, como a pastagem, é diferente da degradação florestal que é a perda parcial da floresta devido a ações antrópicas ou alterações ambientais (ASSIS et al., 2022). Na Amazônia brasileira, o processo de degradação florestal abrange uma combinação de extração de madeira e fogo, provocando perda de biodiversidade, mudanças na estrutura da floresta e estoques de carbono, além de outras implicações (GERWING et al., 2002).

Dessa forma, Assis et al. (2022) projetaram dois cenários de degradação do bioma Amazônia para 2050: 1) Sustentável, com melhorias nas dimensões socioeconômica, institucional e ambiental; e 2) Fragmentação, com enfraquecimento da dimensão socioambiental e urbanização caótica, combinando as premissas dos Cenários de Desmatamento e de Probabilidade de Incêndio. Nas previsões para os anos de 2020 a

2050, as emissões líquidas de CO₂ totalizaram 1.3 Gt CO₂, no Cenário Sustentável e 24.07 Gt CO₂ no cenário Fragmentação, considerando as emissões por degradação florestal e desmatamento.

As análises de Assis et al. (2022), mostraram repetidos eventos de degradação no norte do estado de Mato Grosso e no sudeste e nordeste do estado do Pará, sendo as áreas mais afetadas pela degradação em ambos os cenários. O cenário Sustentável, mostrou regiões de floresta intacta, principalmente no leste do estado do Amazonas (ASSIS et al., 2020). Um dos principais fatores de degradação florestal é o fogo. Os incêndios florestais têm aumentado sua frequência nos últimos anos (LI et al., 2020), causando diversas consequências ambientais, como a diminuição da qualidade da água e do solo e no clima. Incêndios que afetam grandes áreas geralmente são consequências de atividades humanas e condições climáticas extremas (OLIVEIRA et al. 2022)

Oliveira et al. (2022) modelaram o risco de incêndios de alto impacto (HIF); as simulações indicam que, até 2050, o HIF poderia crescer de 3 % para 15 % da área do Cerrado e duplicar na Amazônia. Historicamente, 55 % das áreas queimadas na Amazônia ocorrem em propriedades privadas (MapBiomass, 2021).

No Cerrado, Ferreira et al. (2012) projetaram aumento de 15,3 % no desmatamento ($\approx 40\,000\text{ km}^2$) até 2050, usando cenários BAU com variáveis de fertilidade, relevo e infraestrutura.

A validação dos modelos de uso e cobertura da terra é uma etapa essencial para garantir a confiabilidade e robustez das projeções espaciais geradas. Diversas métricas são empregadas para quantificar o grau de precisão entre os dados simulados e os observados, sendo a acurácia global um dos indicadores mais utilizados, acompanhada de medidas estatísticas como o Erro Médio Absoluto (MAE) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), que avaliam a magnitude dos erros de previsão. Além dessas métricas, abordagens específicas como a similaridade média mínima, implementada no software Dinâmica EGO, possibilitam a análise da correspondência espacial entre mapas simulados e reais, levando em conta a incerteza inerente à simulação de fenômenos complexos (Hagen, 2003). Adicionalmente, índices de concordância categórica, como o coeficiente kappa de Cohen (1968) e o V de Cramer, são amplamente utilizados para aferir a consistência entre classes temáticas de uso e cobertura da terra, permitindo uma avaliação mais detalhada da distribuição espacial dos erros e acertos do modelo. A combinação dessas técnicas contribui para a calibração dos modelos e aumenta a

confiabilidade das projeções em estudos de planejamento territorial e conservação ambiental.

Os resultados sugerem que a conversão da terra agrava perda de biodiversidade, mudanças climáticas regionais e degradação de serviços ecossistêmicos. A Amazônia regula chuvas regionais (Marengo et al., 2018) e, após incêndios, a biomassa demora anos a se recuperar (Brando et al., 2019). GEEs acumulados podem empurrar o bioma para um estado de baixa biomassa (Brando et al., 2019; Ramming et al., 2010).

O Cerrado, hotspot de biodiversidade e reservatório hídrico, já perdeu 46 % da vegetação nativa (MapBiomas, 2021) e abriga 30 % de pastagens cultivadas – 39 % degradadas (Pereira et al., 2018). Embora savanas sejam essenciais, a conservação global privilegia florestas (Bustamante et al., 2022); assim, o bioma é tratado como fronteira agrícola (Rattis et al., 2021). Entre 2002-2011, o ritmo de desmatamento no Cerrado foi 2,5 vezes maior que o da Amazônia (Strassburg et al., 2017), mas apenas 11 % de sua área está protegida.

Pesquisadores alertam que prosseguir na conversão de terras pode comprometer segurança alimentar, energética e hídrica (Bustamante et al., 2022). A transição Amazônia Cerrado enfrenta secas severas (Marengo et al., 2022), e há indícios de “savanização” amazônica (Nobre, 2021; Sullivan et al., 2020). A interação entre os dois biomas exige abordagem integrada que concilie expansão agrícola e conservação.

REFERÊNCIAS

ABIEC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE. Relatório Anual 2022. São Paulo, 2022.

AGÊNCIA BRASIL. Programa de redução de desmatamento e incêndios na Amazônia é lançado pelo presidente Lula. Agência Brasil, Brasília, 17 set. 2025. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/meio-ambiente/audio/2025-09/lula-lanca-programa-de-reducao-de-desmatamento-e-incendios-na-amazonia>. Acesso em: 18 set. 2025.

ALAMANOS, G. S. et al. Land use change modeling using Cellular Automata-Markov and machine learning techniques: A case study. *Ecological Indicators*, v. 141, p. 109104, 2023.

ÁLVAREZ-MALVIDO, M. A importância das Unidades de Conservação na proteção da biodiversidade. *Revista Brasileira de Ecologia*, v. 21, n. 3, p. 87-102, 2021.

ASSIS, T. O. et al. Cenários de degradação florestal na Amazônia: emissões e impactos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 5, p. 1912-1934, 2022.

BRANDO, P. M. et al. The gathering firestorm in southern Amazonia. *Science Advances*, v. 5, n. 1, p. eaay1632, 2019.

BRASIL. Decreto de 1º de dezembro de 2008. Institui o Plano Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 2 dez. 2008.

BRITO, B. et al. Governança ambiental na Amazônia: desafios e perspectivas. *Estudos Avançados*, v. 20, n. 58, p. 157-180, 2006.

BUSTAMANTE, M. M. C. et al. Cerrado: past, present, and future of a biodiversity hotspot. *Biota Neotropica*, v. 22, n. 1, e20221432, 2022.

BUSTAMANTE, M. M. C.; FERREIRA, L. G. Dinâmica da expansão agrícola no Cerrado: impactos e desafios. *Cadernos de Geociências*, v. 12, n. 1, p. 45-60, 2010.

COE, M. T. et al. Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south–southern Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 373, 2017.

COSTA, M. H.; PIRES, G. 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*, v. 30, n. 13, p. 1970–1979, 2009.

DUFFY, P. B. et al. Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 7, p. 2405-2412, 2015.

EASTMAN, J. R. *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System: Manual*. Worcester: Clark University, 2016.

FAVORETTO, F. et al. Governança da terra e conflitos territoriais: uma análise da fronteira agrícola no Brasil. *Revista NERA*, v. 15, n. 20, p. 15-34, 2012.

FERREIRA, L. G. et al. Dinâmica do desmatamento e mudanças de uso da terra no Cerrado: projeções até 2050. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 5, p. 595-604, 2012.

FLORES, B. M. et al. Critical transitions in the Amazon forest system. *Nature*, v. 623, p. 342-349, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>

.

FONSECA, A. et al. Políticas ambientais no Brasil: avanços e retrocessos. *Sustentabilidade em Debate*, v. 14, n. 1, p. 11-30, 2023.

GERWING, J. J. et al. A guide to understanding and monitoring selective logging and its effects in tropical forests. *CIFOR Occasional Paper*, n. 25, 2002.

HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 17, n. 3, p. 235-249, 2003.

HEISTERMANN, M.; MÜLLER, C.; KLEIN, R. A. Land in sight? Achievements, deficits and potentials of global land use modeling. *Agricultural Ecosystems & Environment*, v. 114, p. 141–158, 2006.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Unidades de Conservação no Brasil. Brasília: IBAMA, 2009.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite – PRODES. São José dos Campos: INPE, 2019.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Commodities e Crescimento Econômico no Brasil. Brasília: IPEA, 2016.

LABIM, A. M. et al. Global agriculture expansion and land use change: A review. *Environmental Research Letters*, v. 8, p. 014001, 2013.

LE PAGE, Y. et al. Modelling fire vegetation interactions in the Amazon: A regional-scale process-based approach. *Global Change Biology*, v. 21, p. 1579–1595, 2015.

LE PAGE, Y. et al. Modeling fire-induced deforestation in Amazonia. *Environmental Research Letters*, v. 12, n. 4, p. 045003, 2017.

LIMA, A. P.; NAVES, R. R.; CARVALHO, C. H. de. Sem Cerrado, não há Amazônia. Folha de S. Paulo, Opinião, 17 set. 2025. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/opiniaio/2025/09/sem-cerrado-nao-ha-amazonia.shtml>. Acesso em: 18 set. 2025.

LIMA, J. F. et al. Técnicas de inteligência artificial na modelagem da dinâmica da paisagem. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 65, n. 6, p. 1031-1044, 2013.

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon tipping point: Last chance for action. *Science Advances*, v. 4, n. 2, p. eaat2340, 2018.

MACEDO, M. L. R. A nova pecuária brasileira: desafios e inovações. *Boletim da Embrapa Gado de Corte*, n. 6, 2006.

MALERBA, D. A financeirização da terra e o agronegócio no Brasil. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 22, n. 1, p. 47-63, 2020.

MALHADO, A. C. M. et al. Climate change: impacts on the Amazon. *Nature Climate Change*, v. 10, n. 3, p. 171-172, 2010.

MALLICK, J. et al. Modelling land use change in tropical regions using R: A spatial approach. *Journal of Land Use Science*, v. 16, n. 2, p. 219-238, 2021.

MARENGO, J. A. et al. Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. *Frontiers in Earth Science*, v. 6, p. 228, 2018.

MARENGO, J. A. et al. Extreme Drought in the Brazilian Amazon Basin during the 2020 Dry Season. *Water*, v. 14, n. 2, p. 119, 2022.

MAPBIOMAS. Coleção Anual de Mapas de Uso e Cobertura do Brasil. São Paulo: MapBiomass, 2022.

MENGASSI, A. B. Orçamento ambiental do Brasil: desafios e retrocessos. *Revista Brasileira de Políticas Públicas*, v. 11, n. 2, p. 53-71, 2021.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 5ª fase do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (2023-2027). Brasília: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/controle-ao-desmatamento-queimadas-e-ordenamento-ambiental-territorial/controle-do-desmatamento-1/amazonia-ppcdam-1/5a-fase-ppcdam.pdf>. Acesso em: 18 set. 2025.

MMA/CONAVEG – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE/Comitê Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa. Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa – Planaveg 2025-2028. Brasília: MMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/sbio/dflo/plano-nacional-de-recuperacao-da-vegetacao-nativa-planaveg>. Acesso em: 18 set. 2025.

NOBRE, C. Amazônia e mudanças climáticas: riscos e desafios. *Revista Estudos Avançados*, v. 35, n. 101, p. 27-44, 2021.

NOBRE, C. A. et al. Amazon forest resilience at risk from climate change and deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, v. 121, n. 15, e2317814121, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2317814121>

OLIVEIRA, L. J. C. et al. Modeling the impact of deforestation and climate change on fire regimes in the Amazon. *Global Change Biology*, v. 28, n. 12, p. 3918-3934, 2022.

PAEGELOW, M.; CAMACHO, M. Modelos de simulação de mudanças de uso da terra: conceitos e aplicações. *Ambiente & Sociedade*, v. 11, n. 2, p. 255-270, 2008.

PARENTE, L. L.; FERREIRA, L. G. Mudanças no uso da terra e suas implicações para o Cerrado e Amazônia. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 11, n. 5, p. 1395-1410, 2018.

PARENTE, L. L. et al. Uso do solo e dinâmica territorial nos biomas brasileiros. *Revista Ciência e Natura*, v. 41, n. 1, p. 120-138, 2019.

PEREIRA, M. C. et al. Degradação de pastagens no Cerrado: causas, consequências e recuperação. *Ciência Rural*, v. 48, n. 5, p. e20170858, 2018.

RAMMING, A. et al. Modeling carbon emissions from deforestation in the Amazon. *Ecological Modelling*, v. 221, n. 1, p. 175-184, 2010.

RATTIS, L. et al. Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: biodiversity loss and policy recommendations. *Conservation Letters*, v. 14, n. 4, e12730, 2021.

SCHMIDT, I. B. et al. Fire management in the Brazilian savanna: first steps and the way forward. *Flora*, v. 235-236, p. 15-26, 2018.

SILVA, M. S. et al. Atuação criminosa na Amazônia: desmatamento e incêndios. *Revista Direito Ambiental e Sociedade*, v. 10, n. 1, p. 34-56, 2021.

SOARES-FILHO, B. S. et al. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, v. 440, p. 520-523, 2006.

SOUSA, L. A. Agropecuária e desmatamento no Cerrado: um panorama. *Revista de Estudos Rurais*, v. 3, n. 1, p. 45-62, 2017.

STRASSBURG, B. B. N. et al. Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. *Nature Climate Change*, v. 2, p. 350–355, 2017.

SULLIVAN, M. J. P. et al. Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. *Science*, v. 368, n. 6493, p. 869-874, 2020.

TIEFELSDORF, M. et al. Modeling spatial processes: The autoregressive approach. *Geographical Analysis*, v. 31, n. 2, p. 147-170, 1999.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Glasgow Climate Pact and Sharm el-Sheikh Implementation Plan. United Nations, 2023. Disponível em: <https://unfccc.int/>. Acesso em: 18 set. 2025.

URUÑA, R. Cenários futuros de uso e ocupação do solo e seus impactos socioambientais. *Revista Geografia em Questão*, v. 12, n. 2, p. 23-37, 2019.

WALKER, R. Desmatamento e degradação florestal na Amazônia: causas e consequências. *Ambiente & Sociedade*, v. 23, p. e02308, 2020.

Capítulo 2 – Modelagem de cenários futuros para Amazônia Brasileira (2030 – 2100)

Resumo: A Amazônia desempenha papel central na regulação climática global, na conservação da biodiversidade e na manutenção dos serviços ecossistêmicos que sustentam as atividades socioeconômicas do Brasil. Entretanto, o avanço do desmatamento e a crescente pressão antrópica sobre suas fronteiras agrícolas colocam em risco a integridade desse bioma. Compreender as possíveis trajetórias de uso e cobertura da terra torna-se, portanto, fundamental para subsidiar políticas de mitigação e adaptação frente às mudanças ambientais. Este artigo analisa a dinâmica do uso e cobertura da terra neste bioma, com ênfase na projeção de cenários futuros entre 2030 e 2100. A modelagem foi realizada a partir da criação de um *script* em *Python*, desenvolvido com base nos princípios metodológicos de plataformas consolidadas como Dinâmica EGO e TerrSet, o que possibilitou maior flexibilidade, reprodutibilidade e personalização dos modelos. Foram simulados três cenários – otimista, tendencial e pessimista – que refletem diferentes contextos de governança ambiental e uso e cobertura da terra. Os resultados apontam para trajetórias contrastantes: no cenário otimista, a vegetação nativa mantém aproximadamente 3,46 milhões de km² em 2100, enquanto no cenário tendencial essa área se reduz para 3,04 milhões de km². Já no cenário pessimista, a cobertura de vegetação cai de forma acentuada para 2,76 milhões de km², acompanhada da expansão de pastagens (mais de 1,23 milhão de km²), agricultura (105,3 mil km²) e manchas urbanas (54,7 mil km²). As projeções evidenciam o papel decisivo das políticas públicas no controle do desmatamento e reforçam a importância de abordagens integradas de gestão territorial para evitar o avanço da degradação ambiental na Amazônia.

Palavras-chave: Bioma; modelagem espacial; cenários futuros; uso da terra; desmatamento; Python.

1. Introdução

A Amazônia, um dos mais complexos sistemas ecológicos do planeta, sustenta uma sinergia que interliga biodiversidade, ciclos hidrológicos e estabilidade climática. Responsável por mais de 10% da biodiversidade terrestre global, este bioma ocupa cerca de 421 milhões de hectares, cobrindo quase metade do território brasileiro (MAPBIOMAS, 2024). Além disso, a floresta amazônica constitui um pilar essencial para o funcionamento do sistema climático, reciclando aproximadamente 50% da precipitação regional através da evapotranspiração e armazenando entre 150 a 200 Pg de carbono — o equivalente a 15 a 20 anos de emissões globais de CO₂ (FLORES et al., 2024).

Nas últimas décadas, contudo, a Amazônia tem sido sujeita as modificações antrópicas sem precedentes. Desde 1985, a perda de vegetação nativa supera os 55 milhões de hectares, com destaque para a diminuição da formação florestal primária em mais de 50 milhões de hectares (-15%). No ano de 2023, cerca de 14% da área do bioma era ocupada por pastagens, o que equivale a uma expansão de 363% ao longo de 39 anos (MAPBIOMAS, 2024).

Esse processo, impulsionado por atividades antrópicas como o avanço da agropecuária e a exploração madeireira, vem corroendo a resiliência ecológica da floresta, aproximando o sistema de um possível *tipping point*, quando algumas mudanças podem

desencadear transições abruptas e potencialmente irreversíveis (FLORES et al., 2024; SILVA DIAS et al., 2006).

Modelagens climáticas e paleorregistros indicam que a resiliência amazônica, anteriormente robusta frente às variações ambientais do Cenozoico, está sendo substituída por novas retroalimentações, resultado da interação entre mudanças no uso da terra, aquecimento global, secas extremas e fogo (FLORES et al., 2024). Estima-se que até 47% da floresta poderá, até 2050, estar exposta a distúrbios compostos, aumentando o risco de colapso regional e amplificando a instabilidade climática na América do Sul.

Diversos grupos de pesquisa têm utilizado modelos de simulação para explorar como as mudanças futuras no uso da terra ocorreriam sob diferentes cenários, a partir de uma perspectiva multidisciplinar (J. XU et al., 2021). No entanto, esses estudos, especialmente quando aplicados a áreas extensas como a Amazônia e voltados para projeções de longo prazo, apresentam diversos desafios, como a alta demanda por capacidade de processamento, a ausência de sistemas intuitivos e a complexidade na parametrização dos modelos. Nesse contexto, o uso de ferramentas desenvolvidas em Python, solução adotada na presente pesquisa, surge como uma opção interessante, permitindo automatizar etapas, otimizar recursos computacionais e viabilizar a geração de cenários futuros de forma mais acessível e replicável a outras regiões ou ecossistemas.

Neste ambiente computacional, script baseados em Python, que utilizam as Cadeias de Markov e os Pesos de Evidência de Bayes para a simulação de cenários preditivos, seguem a mesma lógica matemática e estatística adotada por ferramentas já consolidadas, como o Dinamica EGO e o TerrSet. Entretanto, a escolha por empregar uma linguagem de programação aberta, como o Python, representa um avanço em termos de autonomia, transparência e reprodutibilidade das modelagens ambientais. Essa opção permite maior controle sobre o código, a integração com diferentes bibliotecas de análise espacial e estatística e a otimização dos processamentos, reduzindo a demanda computacional. Além disso, a possibilidade de disponibilização dos scripts em repositórios públicos, como o GitHub, facilita o compartilhamento das rotinas de modelagem e a adaptação dos métodos a diferentes recortes espaciais e contextos de pesquisa. Dessa forma, o uso do Python amplia a capacidade de personalização e atualização dos modelos, acompanhando as transformações tecnológicas e as demandas por estudos ambientais mais abertos e colaborativos.

Na atual pesquisa, esse script permite adaptar os parâmetros necessários para compreender como distintas trajetórias de uso e cobertura da terra podem moldar o futuro

do bioma. A construção de cenários futuros, classificados como conservador, moderado e pessimista, permite simular, com base em dados históricos e tendências emergentes, a dinâmica espacial da Amazônia diante de diferentes contextos socioambientais. Essas modelagens não apenas funcionam como ferramentas preditivas, mas também oferecem subsídios críticos à formulação de políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos ambientais (URUEÑA, 2019; HEISTERMANN et al., 2006).

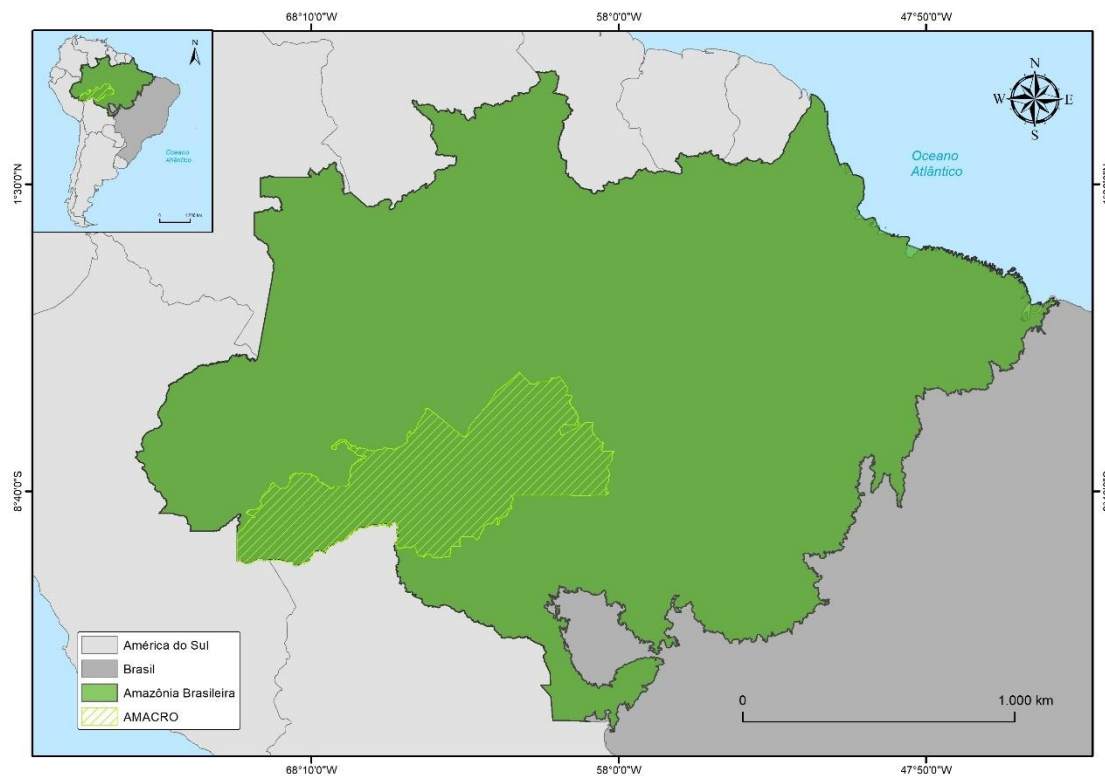
Neste entendimento, o atual estudo tem por objetivo projetar cenários de uso e cobertura da terra na Amazônia brasileira, para o período 2030 a 2100, analisando os potenciais desdobramentos espaciais da conversão da paisagem sob diferentes níveis de intervenção antrópica e políticas públicas. Através dessa abordagem, busca-se contribuir para a compreensão das condições limítrofes que podem conduzir o sistema amazônico à superação de um “ponto de não-retorno”, com implicações profundas sobre o equilíbrio ambiental regional e global.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo, representada na Figura 1, corresponde ao bioma Amazônia, localizado majoritariamente na região Norte do Brasil. Com uma extensão de aproximadamente 4.196.943 km², o bioma ocupa cerca de 49% do território nacional e abrange nove estados brasileiros (MAPBIOMAS, 2024; IBGE, 2019). Segundo dados do Censo de 2022, mais de 20 milhões de pessoas vivem na região, incluindo populações urbanas, povos indígenas e comunidades tradicionais (IBGE, 2022).

Figura 1 – Mapa de Localização do bioma Amazônia no Brasil, com destaque para a região identificada como AMACRO (sigla dos estados Amazonas, Acre e Rondônia).



Fonte: IBGE (2024).

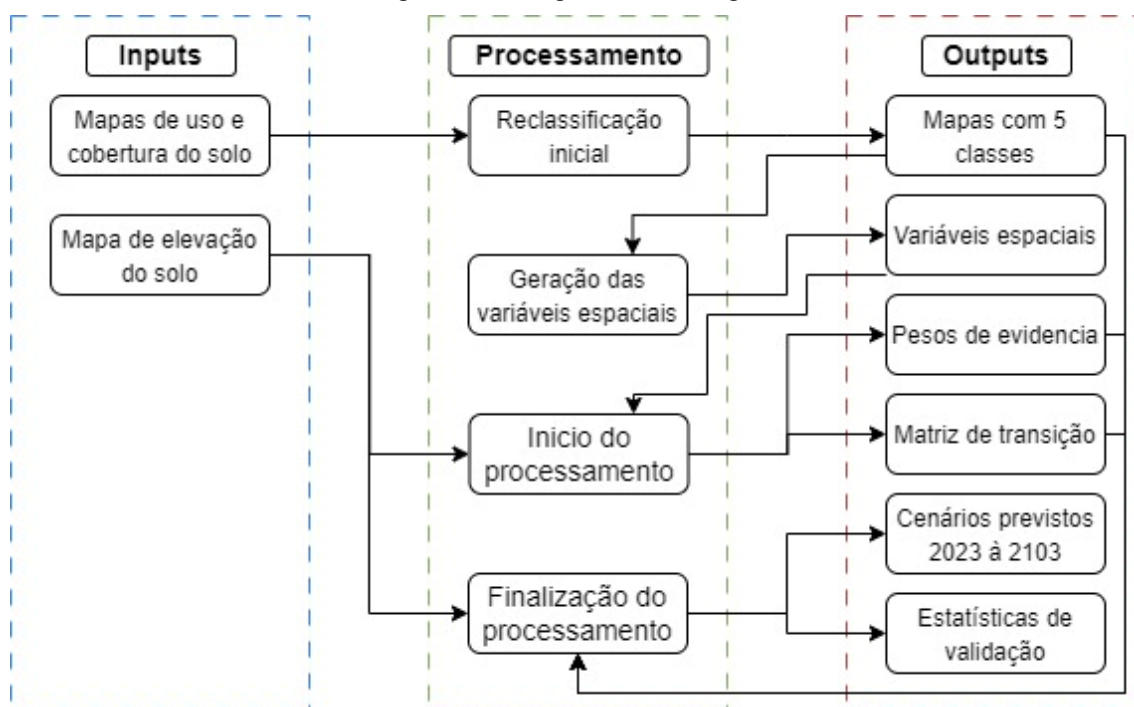
O relevo predominante é plano ou suavemente ondulado, com altitudes geralmente inferiores a 200 metros, especialmente na porção central da bacia, onde se concentram os principais rios e extensas áreas de floresta contínua (RADAMBRASIL, 1983). Em algumas regiões, como os interflúvios do Purus e do Madeira, o terreno apresenta características levemente onduladas, com presença de terra firme, várzea e igapó.

O bioma Amazônia abriga ainda uma das maiores redes de áreas protegidas do mundo, com cerca de 28% de sua extensão sob algum tipo de unidade de conservação (UC), entre categorias de uso sustentável e proteção integral (MMA, 2023). As UCs estão distribuídas em diferentes escalas administrativas, com destaque para as Reservas Extrativistas, Florestas Nacionais, Parques e Estações Ecológicas. Além disso, a região compreende a maior bacia hidrográfica do planeta — a Bacia Amazônica — com cerca de 6,1 milhões de km², sendo aproximadamente 60% dessa área em território brasileiro (ANA, 2020). Essa rede hidrográfica é composta por rios de grande porte, como o Amazonas, o Negro, o Madeira e o Tapajós, e apresenta um dos maiores volumes de descarga de água doce para os oceanos do mundo (NOBRE et al., 2016; FEARNSSIDE, 2015).

2.2 Fluxograma metodológico

A metodologia empregada neste estudo pode ser compreendida em quatro etapas principais: aquisição dos dados, reclassificação e geração de variáveis espaciais, modelagem preditiva e, por fim, validação dos resultados. A Figura 2 apresenta um fluxograma esquemático com o detalhamento de cada uma dessas etapas, permitindo uma visão geral do processo metodológico adotado, a fim de compreender melhor cada etapa adotada.

Figura 2 – Fluxograma metodológico.



Fonte: Autores (2025)

2.3 Base de dados

As bases de dados empregadas neste estudo estão listadas a seguir acompanhadas dos procedimentos analíticos correspondentes.

- 1) **Mapa de uso da terra** (estado inicial da paisagem do bioma, sendo o T1 e T2 e T3). Optou-se pelo mapa de uso e cobertura da coleção 9 do MapBiomias, que se constitui como o maior acervo de dados de uso dos biomas brasileiros, possuindo dados de 1986 a 2023. A Coleção 9 oferece um dos mapeamentos mais precisos já produzidos para a Amazônia, com acurácia de global de 97,7% no Nível 1 e 96,8% no Nível 2 (MapBiomias, 2024). Estes dados,

possuem uma resolução espacial de 30 metros, e são gerados a partir da análise de séries temporais de imagens Landsat, utilizando classificadores automáticos baseados em aprendizado de máquina e validação com amostras de campo. A classificação temática é organizada em seis grandes classes de uso e cobertura da terra e cada uma delas é desdobrada em subclasses, permitindo a identificação mais precisa dos elementos presentes em cada pixel, como pastagem, floresta, área urbana consolidada, entre outros. Dessa forma, foi utilizado os dados para a área do bioma Amazônia, para os anos de 2002, 2012 e 2022.

- 2) **Declividade.** Foi derivada a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado com base nas imagens de altimetria da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Para o cálculo, aplicou-se uma estatística de vizinhança, utilizando o desvio padrão em uma matriz 3x3, o que permitiu capturar não apenas a inclinação do terreno, mas também a variação dessa inclinação entre os pixels adjacentes. Esse procedimento possibilitou identificar e destacar as áreas com menor desvio padrão da altitude, representando regiões mais planas, e aquelas com maior variação altimétrica, indicando terrenos com maior declividade.
- 3) **Mapa de estradas.** Foi obtido a partir da base de dados do Open Street Map (OSM), uma plataforma colaborativa que reúne informações geoespaciais atualizadas por usuários em todo o mundo. Foram extraídas as feições lineares correspondentes a rodovias pavimentadas, não pavimentadas e em construção, recortadas conforme o limite do bioma Amazônia. Essa base se destaca pela ampla cobertura, constante atualização e riqueza de atributos, permitindo análises detalhadas da infraestrutura de transporte na região.
- 4) **Mapa de Hidrografia.** Disponibilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), este mapa representa os cursos d'água do país, conforme a base hidrográfica oficial do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), em escala de 1:1.000.000. As feições hidrográficas foram recortadas segundo o limite do bioma Amazônia, abrangendo rios principais, afluentes e demais trechos da rede de drenagem.

2.4 Reclassificação

Com o objetivo de simplificar a modelagem, as classes originais do MapBiomias foram reclassificadas em cinco categorias principais: vegetação natural, agricultura, pastagem, área urbana e corpos d'água. Essa reclassificação permite um melhor entendimento das transições de uso e cobertura da terra, reduzindo a complexidade do modelo e diminuindo o esforço computacional sem comprometer a representatividade dos processos espaciais observados (ALAMANOS, 2023).

Para a reclassificação dos dados de uso e cobertura da terra obtidos através da plataforma MapBiomias, utilizou-se a ferramenta *Reclassify* do ArcGIS Pro. Essa ferramenta permite alterar os valores de cada pixel em um raster de acordo com um padrão pré-estipulado, facilitando as futuras análises e interpretação dos dados. Dessa forma, a reclassificação foi realizada convertendo todas as classes originais do MapBiomias e os novos valores atribuídos.

2.5 Variáveis espaciais

Com o objetivo de aprimorar a capacidade explicativa do modelo preditivo e aumentar sua relevância analítica, foram incorporadas variáveis espaciais que representam a distância em relação às principais classes de uso antrópico: agricultura, pastagem, áreas urbanas, estradas e hidrografia. A inclusão dessas variáveis permite ao modelo capturar relações espaciais mais complexas no território, reconhecendo fatores externos que influenciam as transições entre as classes de uso e cobertura da terra.

Tomando como base o mapa de uso e cobertura da terra referente ao ano de 2022 e os mapas de declividade, estradas, hidrografia, foi utilizada a ferramenta *Euclidean Distance* do software ArcGIS para gerar rasters contínuos de distância para cada uma das classes selecionadas. Esses rasters foram posteriormente reclassificados em uma escala de 1 a 10, na qual valores mais altos representam maior proximidade às feições antrópicas, enquanto os valores mais baixos indicam maior distância.

A reclassificação em uma escala comum facilita a padronização das variáveis, promovendo a integração eficiente ao modelo e permitindo maior escalabilidade. Essa abordagem elimina a necessidade de ajustes individuais entre diferentes tipos de variáveis, além de contribuir para a correta atribuição de pesos pelo modelo, conforme os princípios da inferência bayesiana.

2.6 Modelagem das mudanças e simulação de cenários futuros

A simulação dos cenários futuros de uso e cobertura da terra foi realizada por meio de um modelo híbrido, que integra Pesos de Evidência (WoE), fundamentado no Teorema de Bayes, com Autômatos Celulares acoplados a Cadeias de Markov (CA-Markov). Essa abordagem permite representar tanto a dimensão estatística quanto a estrutura espacial das transições entre classes de uso e cobertura da terra, sendo amplamente empregada em estudos de mudanças ambientais com foco em dinâmicas antrópicas (MARKO et al., 2016; PEDROSA; CÂMARA, 2002).

1. Cálculo dos Pesos de Evidência (WoE)

A etapa inicial do processo consiste na aplicação do modelo de Pesos de Evidência, conforme proposto por Bonham-Carter (1994), com base na seguinte formulação bayesiana (Eq. 01):

$$W^+ = \ln \left(\frac{P(B|A)}{P(B|\neg A)} \right) \quad \text{e} \quad W^- = \ln \left(\frac{P(\neg B|A)}{P(\neg B|\neg A)} \right)$$

Eq. 01

Onde:

- **W+** representa o peso de evidência favorável à ocorrência da transição;
- **W-** representa o peso contrário à ocorrência da transição;
- **P(B|A)** é a probabilidade condicional da transição B ocorrer na presença da variável A;
- **P(B|¬A)** é a probabilidade de a transição ocorrer na ausência da variável;
- **ln** é o logaritmo natural.

Esses pesos foram calculados a partir de mapas reclassificados das variáveis explicativas (ex: declividade, distâncias às classes antrópicas) em valores de 1 a 10. A reclassificação padroniza a influência das variáveis, promovendo a comparabilidade entre elas.

2. Geração da Matriz de Transição

Com base em dois mapas de uso e cobertura da terra espaçados em 10 anos, é construída uma matriz de transição de Markov, que estima a probabilidade de mudança entre as classes no intervalo considerado. A fórmula geral é (Eq. 02):

:

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}}$$

Eq. 02

Onde:

- P_{ij} é a probabilidade de transição da classe i para a classe j ;
- n_{ij} é o número de pixels que mudaram de i para j ;
- A soma é realizada sobre todas as classes j .

Essa matriz representa o componente temporal do modelo e serve como base para a simulação futura.

3. Simulação com Autômatos Celulares de Markov (CA-Markov)

A simulação espacial é realizada por meio da integração da matriz de transição com Autômatos Celulares, que consideram o estado dos pixels vizinhos para definir a transição de cada célula. A influência espacial é avaliada a partir de uma janela de vizinhança 7×7 , segundo a lógica (Eq. 03):

:

$$P_{ij}(x, y) = P_{ij} \cdot f(N_{xy})$$

Eq. 03

Onde:

- $P_{ij}(x, y)$ é a probabilidade ajustada de transição para o pixel (x, y) ;
- $f(N_{xy})$ é uma função de influência dos vizinhos (número ou predominância de determinada classe na vizinhança).

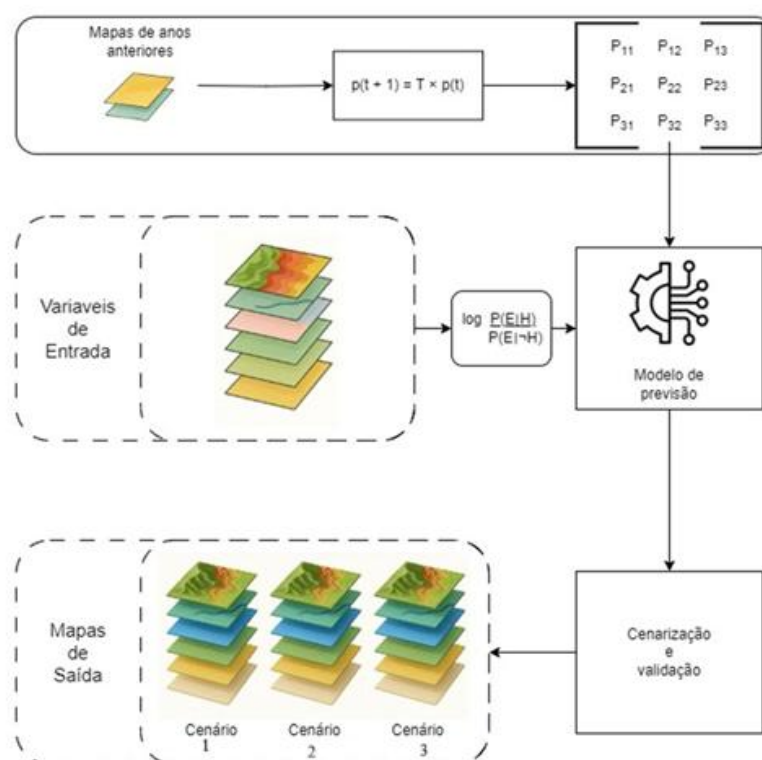
O Cellular Automata Markov (CAM) é um dos modelos mais confiáveis e utilizados por pesquisadores para uma análise espacial e temporal das mudanças de uso e cobertura da terra (Marko et al., 2016). Segundo Pedrosa e Câmara (2002), as cadeias de Markov são modelos matemáticos para descrever processos estocásticos. Integrando a matriz de transição com a abordagem de Autômatos Celulares, o modelo incorpora a

influência espacial dos vizinhos em cada célula. Essa integração aumenta o realismo espacial das simulações, capturando padrões de mudança que dependem da configuração espacial das classes.

4. Previsões até 2100.

O modelo resultante (figura 3) foi aplicado para gerar previsões decenais do uso e cobertura da terra até o ano de 2100, totalizando oito mapas preditivos (de 2030 a 2100), junto com um de validação (2023). Essa projeção permite visualizar possíveis cenários futuros e subsidiar o planejamento territorial.

Figura 3 – Processos da simulação dos cenários



Fonte: Autores (2025).

O fluxo do processo inicia com a leitura do mapa de uso e cobertura da terra do ano mais recente disponível, juntamente com as variáveis explicativas necessárias para o cálculo dos pesos de evidência, que são armazenados em uma variável global para uso posterior. Em seguida, inicia-se um *loop* que percorre pares de mapas em intervalos de 10 anos (por exemplo, 2000 e 2010, depois 2010 e 2020, e assim por diante). Para cada

par, calcula-se a matriz de transição, o script, então, analisa cada pixel individualmente, considerando sua categoria atual e os valores dos pixels em uma janela de 7 x 7 ao redor.

Nesse ponto, aplica-se o Índice de Pressão de Desmatamento (IPD), responsável por ajustar as probabilidades de transição com base na influência exercida pela vizinhança e no contexto de pressão antrópica definido para cada cenário. O IPD foi padronizado em uma escala de 0 a 10, em que valores próximos de 0 indicam ausência ou baixa pressão, e valores próximos de 10 representam pressão muito alta.

A calibração do IPD foi realizada a partir da série histórica de desmatamento da Amazônia (PRODES/INPE). Inicialmente, foram definidas três taxas de referência: (i) taxa tendencial, obtida pela média recente (2018–2022), representando o padrão atual; (ii) taxa otimista, equivalente a 80% da taxa tendencial, simulando maior controle e efetividade de políticas ambientais; e (iii) taxa pessimista, baseada na média dos anos de pico de desmatamento (2013, 2014, 2015 e 2022), refletindo forte expansão da fronteira agropecuária. Essas taxas foram então normalizadas para a escala do IPD e associadas a limites superiores distintos para cada cenário, que modulam a influência da vizinhança na probabilidade de conversão da vegetação nativa.

Após essa etapa, a influência das variáveis explicativas (declividade, distância a pastagem, agricultura, áreas urbanas, hidrografia e estradas) é incorporada para ajustar a probabilidade de transição para cada uma das classes disponíveis e estimar a provável transição do pixel em análise. Concluído o processamento, o novo mapa é salvo e o ciclo se repete para o próximo par de anos, permitindo a geração sequencial de mapas preditivos ao longo do tempo.

O IPD é fundamentado no conceito de matrizes de pesos espaciais, amplamente utilizadas para representar a dependência entre unidades territoriais adjacentes em estatística espacial (ZHOU et al., 2008; GETIS, 2004). Nessas matrizes, cada elemento w_{ij} expressa o grau de relação entre as localidades i e j , sendo um recurso essencial para modelar autocorrelação e efeitos espaciais. Em termos práticos, valores mais altos de IPD indicam forte influência de áreas preservadas sobre seu entorno, favorecendo a conectividade ecológica e reduzindo a probabilidade de conversão. Já valores mais baixos indicam menor influência das áreas vizinhas, favorecendo processos de fragmentação e maior vulnerabilidade à conversão. Essa lógica se aproxima dos efeitos de espalhamento espacial (*spillover*) discutidos por Zhang et al. (2023), que demonstram como o desmatamento em uma área pode influenciar negativamente áreas adjacentes.

Essa parametrização, calibrada com dados do PRODES, permite que o modelo capture padrões espaciais e temporais mais realistas, alinhando os resultados de simulação às tendências observadas na Amazônia nas últimas décadas.

2.7 Validação do modelo

Antes de gerar os cenários futuros, foi realizada uma etapa de validação do modelo. Para isso, foi simulado o mapa de 2022 com base nas transições observadas entre os anos de 2002 e 2012. O resultado foi comparado com o mapa real de 2022 para avaliar a acurácia do modelo.

Foram utilizados três métricas estatísticas: o índice de similaridade (Kappa), o erro médio absoluto (MAE) e o erro quadrático médio (RMSE) para avaliar a qualidade da previsão.

1 - Índice Kappa (Coeficiente de Concordância de Kappa de Cohen) (Eq. 04):

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

Eq. 04

Onde:

- p_o é a proporção de concordância observada;
- p_e é a proporção de concordância esperada pelo acaso.

O valor de κ varia de -1 a 1, sendo:

- $\kappa = 1$: concordância perfeita,
- $\kappa = 0$: concordância ao acaso,
- $\kappa < 0$: discordância sistemática.

2- Erro Médio Absoluto (MAE – *Mean Absolute Error*) (Eq. 05):

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Eq. 05

Onde:

- y_i é o valor observado,
- \hat{y}_i é o valor predito,
- n é o número total de observações.

3- Erro Quadrático Médio (RMSE – Root Mean Square Error) (Eq. 06):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Eq. 06

Onde:

- y_i é o valor observado para o pixel i ;
- \hat{y}_i é o valor previsto para o pixel i ;
- n é o número total de pixels avaliados.

Assim como o MAE, o RMSE mede o desvio entre valores observados e previstos, mas penaliza mais fortemente erros maiores devido à elevação ao quadrado. Com a validação apresentando resultados satisfatórios, prosseguiu-se com a geração dos cenários futuros de uso e cobertura da terra até 2103.

2.8 Acurácia

A acurácia é uma métrica amplamente utilizada para avaliar o desempenho de classificações temáticas, como mapas de uso e cobertura da terra. Ela representa a proporção de acertos do modelo em relação ao total de observações avaliadas, indicando o quão próximo os resultados da simulação estão da realidade observada ou do dado de referência. Trata-se de uma medida simples e direta, que resume a taxa global de concordância entre os dados classificados e os dados de validação. Dessa forma, valores de acurácia superiores a 90% são considerados excelentes, entre 80% e 90% são bons, entre 70% e 80% são aceitáveis, e abaixo de 70% indicam baixa confiabilidade.

A acurácia global (A) é calculada a partir da matriz de confusão, utilizando a seguinte fórmula (Eq. 07):

:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ii}}{N}$$

Eq. 07

Onde:

- x_{ii} representa os valores na diagonal principal da matriz de confusão (os acertos para cada classe),
- N é o número total de amostras avaliadas,
- n é o número total de classes.

5. Resultados e Discussões

3.1 Validação dos modelos

A validação dos modelos de simulação espacial aplicados ao bioma Amazônia foi conduzida com base em três métricas de desempenho amplamente utilizadas: acurácia (*accuracy*), erro absoluto médio (MAE) e erro quadrático médio (MSE). Os resultados obtidos foram consistentes entre os três cenários analisados: Conservador, Moderado e Pessimista, evidenciando a estabilidade estrutural do modelo frente às variáveis utilizadas.

A acurácia dos modelos alcançou 0,964, indicando que aproximadamente 96% das transições simuladas coincidiram com os padrões observados no período de calibração, o que reflete uma elevada capacidade de representação da dinâmica espacial histórica. O erro absoluto médio foi de 0,05, representando uma discrepância média de 5% entre os valores previstos e os reais. Já o erro quadrático médio foi de 0,11, valor que penaliza discrepâncias maiores e permanece dentro de uma faixa considerada adequada para modelos de simulação espacial de alta complexidade.

A homogeneidade dos resultados de validação entre os cenários indica que as variações nas regras de influência da vizinhança afetam exclusivamente as projeções

futuras, não comprometendo a capacidade do modelo de reproduzir o padrão espacial no período de referência. Esses resultados reforçam a robustez do modelo calibrado, validando sua aplicação para a geração de cenários de uso e cobertura da terra na Amazônia.

3.2 Mudanças de Uso e Cobertura da Terra de 2030 a 2100, em diferentes cenários.

A interação entre as mudanças naturais e antrópicas dos cinco usos da terra analisados nos modelos mostra que os cenários seguem trajetórias distintas entre 2030 e 2100 (Figura 4 e Tabela 1). Apesar dessas diferenças, prevalece em todos os cenários a diminuição das áreas de vegetação e a expansão das áreas antrópicas, sobretudo a pastagem e a urbanização.

A cobertura de vegetação nativa apresenta declínio contínuo em todos os cenários, variando apenas em intensidade. No cenário Otimista, observa-se uma queda discreta de 3.482.134 km² em 2030 para 3.459.232 km² em 2100, o que representa uma redução de apenas 0,66% em 70 anos. Esse resultado reflete o efeito das variáveis mais restritivas adotadas no modelo, indicando que políticas ambientais rigorosas podem ser eficazes na contenção da perda florestal. Já no cenário Tendencial, a redução é significativamente maior, passando de 3.467.499 km² para 3.043.571 km², equivalente a 12,23%. O cenário Pessimista apresenta a trajetória mais crítica, com a vegetação encolhendo de 3.456.953 km² para 2.759.687 km², uma perda de 20,17% no período cerca de 30 vezes mais intensa que no cenário Otimista e 1,6 vez superior ao Tendencial.

Tabela 1 – Projeções de uso e cobertura da terra na Amazônia (km²) para os cenários Otimista, Tendencial e Pessimista entre 2030 e 2100.

Ano	Cenário	Vegetação	Pastagem	Agricultura	Mancha Urbana	Água
2030	Otimista	3.482.133,96	588.153,36	74.239,91	8.428,23	119.343,74
	Tendencial	3.467.499,00	602.322,94	74.879,96	8.358,42	119.238,90
	Pessimista	3.456.952,80	612.493,86	75.324,70	8.326,80	119.201,00
2050	Otimista	3.477.041,48	586.880,78	74.171,63	15.070,09	119.135,22
	Tendencial	3.375.490,10	682.776,27	78.852,11	16.779,36	118.401,32
	Pessimista	3.295.882,97	759.519,64	82.331,94	16.712,29	117.852,39
2100	Otimista	3.459.231,80	582.982,07	73.946,12	37.373,92	118.765,29
	Tendencial	3.043.571,02	971.659,91	94.096,96	47.816,77	115.154,54
	Pessimista	2.759.687,32	1.239.800,28	105.332,80	54.726,34	112.752,45

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados de modelagem.

As áreas de pastagem exibem a tendência inversa da vegetação, com crescimento acentuado principalmente nos cenários de menor controle ambiental. No Otimista, a área praticamente se mantém estável, caindo levemente de 588.153 km² para 582.982 km² (-0,88%). No Tendencial, a expansão é marcante: de 602.323 km² para 971.660 km², crescimento de 61,32%. Já no Pessimista, a área de pastagem mais que dobra, saltando de 612.494 km² em 2030 para 1.239.800 km² em 2100, um aumento expressivo de 102,42%. Esse avanço ocorre majoritariamente sobre vegetação nativa, evidenciando que menores níveis de governança resultam em conversões aceleradas e descontroladas.

A agricultura também se expande, mas em menor magnitude. No Otimista, a área agrícola se mantém praticamente estável, recuando levemente de 74.240 km² para 73.946 km² (-0,40%). No Tendencial, cresce de 74.880 km² para 94.097 km², um aumento de 25,66%. No Pessimista, a expansão é ainda maior, de 75.325 km² para 105.333 km², correspondendo a 39,84% de crescimento. Embora menos expressiva que a pastagem, essa expansão recai sobre áreas de vegetação, sugerindo intensificação da produção e possível substituição de sistemas tradicionais por cultivos mais intensivos.

A urbanização é a classe que mais cresce proporcionalmente em todos os cenários. No Otimista, a mancha urbana passa de 8.428 km² em 2030 para 37.374 km² em 2100, um aumento de 343%. No Tendencial, sobe de 8.358 km² para 47.817 km², crescimento de 472%. O Pessimista mostra a expansão mais alarmante, de 8.327 km² para 54.726 km², representando um aumento de 557%. Esse padrão evidencia que, independentemente do nível de regulação, a urbanização tende a avançar fortemente, mas em contextos de baixa governança pode estar associada à ocupação desordenada, especulação imobiliária e financeirização da terra.

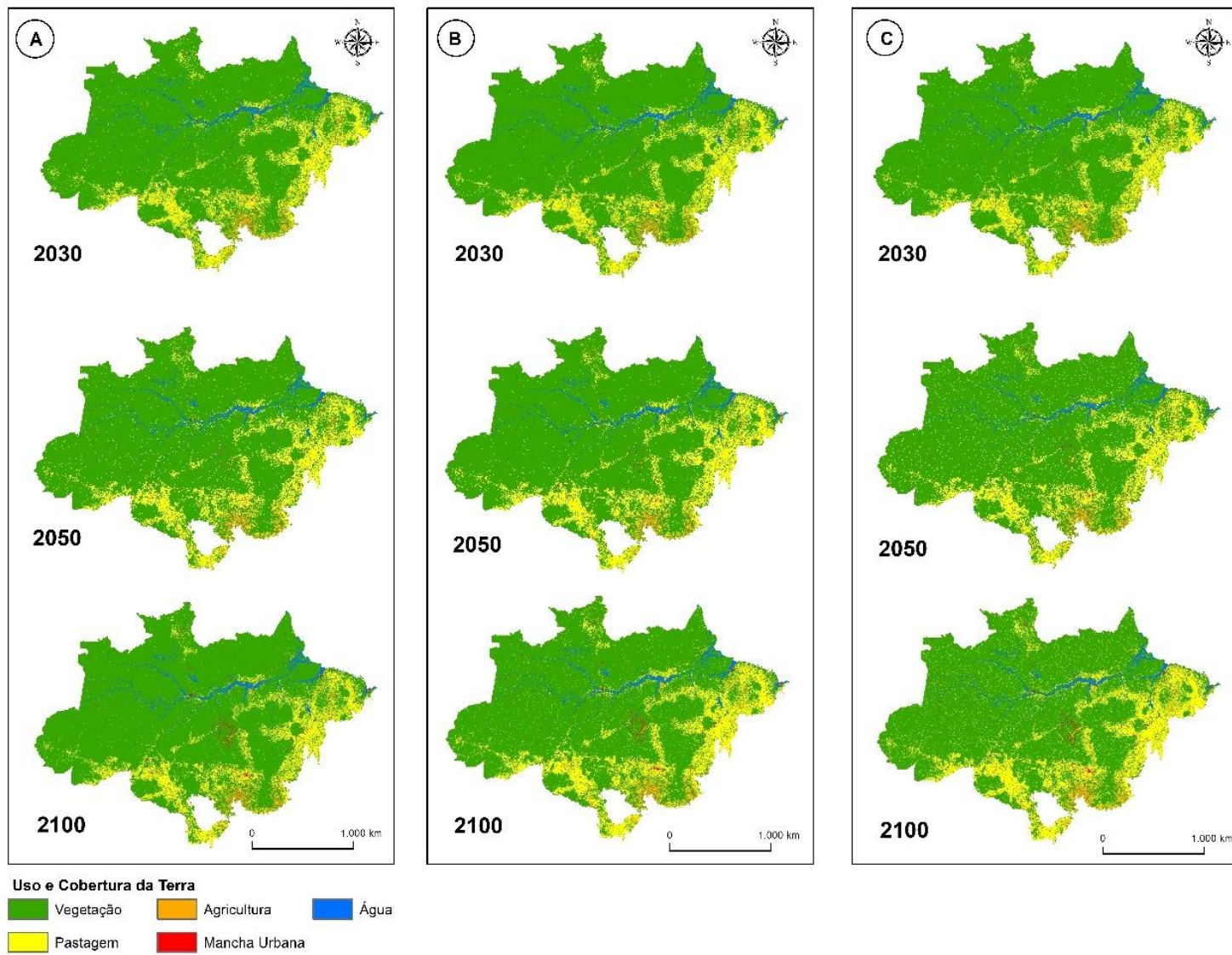
A classe água apresenta relativa estabilidade ao longo do tempo, com variações discretas. No cenário Otimista, esta cai de 119.344 km² para 118.765 km² (-0,48%). No Tendencial, a redução é de 3,43%, passando de 119.239 km² para 115.155 km². No Pessimista, o recuo é mais acentuado, chegando a -5,41%, de 119.201 km² para 112.752 km². Apesar da estabilidade aparente, a redução hídrica nos cenários menos regulados pode refletir impactos ambientais indiretos, como degradação de margens, assoreamento e redução de vazões, frequentemente associados à expansão agropecuária e urbana.

A representação espacial desses cenários prospectivos evidencia contrastes marcantes. No Pessimista, há um avanço expressivo da agricultura e da pecuária, sobretudo nas bordas sul e leste da Amazônia, resultando em perda significativa da vegetação nativa e expansão desordenada dos usos antrópicos. O Tendencial apresenta

crescimento antrópico menos acelerado, mas ainda relevante, com maior retenção da vegetação em áreas centrais. O Otimista, por sua vez, revela maior estabilidade, com expansão mais contida das atividades humanas e manutenção expressiva da cobertura vegetal.

Esses resultados reforçam que as trajetórias futuras da Amazônia estão diretamente condicionadas às decisões políticas e institucionais sobre o uso da terra. A governança ambiental será determinante para a conservação da vegetação nativa e para a mitigação dos impactos socioambientais ao longo das próximas décadas.

Figura 4 – Mapas de uso e cobertura da terra na Amazônia (km²) para os cenários entre 2030 e 2100. A = otimista, B = tendencial e C = pessimista.



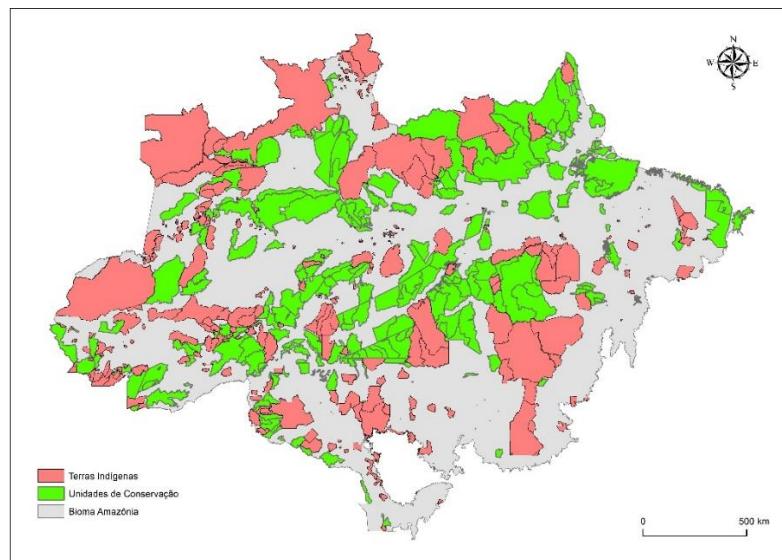
Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados de modelagem.

O bioma Amazônia abriga 247 Unidades de Conservação (UCs), entre federais e estaduais, o que representa cerca de 73% do total de UCs do Brasil (ICMBio, 2024). Também é onde se concentram 430 Terras Indígenas (TIs), que ocupam cerca de 23% da área do bioma e correspondem a 98% de todas as TIs reconhecidas no país (ISA, 2024). Podemos observar o tamanho dessas áreas na figura 5.

Essas áreas são fundamentais, são responsáveis por auxiliar na proteção da floresta. Diversos estudos já mostraram que UCs e TIs são muito mais eficazes em conter o avanço do desmatamento do que as áreas não protegidas. Ferreira et al. (2005), por exemplo, observaram que o desmatamento foi entre 10 e 20 vezes menor dentro dessas áreas em estados como Mato Grosso e Pará, mesmo em contextos de forte pressão fundiária.

Mais recentemente, Walker et al. (2023) reforçaram a importância dos territórios indígenas legalmente reconhecidos, mostrando que nesses espaços a perda florestal pode ser até 66% menor. Além disso, são justamente as UCs e TIs que abrigam os maiores estoques de carbono da região, cerca de 60% do carbono acima do solo da Amazônia está dentro desses territórios (Mongabay, 2025).

Figura 5 – Unidades de Conservação e Terras Indígenas na Amazônia



Fonte: ICMBio, 2022.

O estudo do FUNBIO (2018) mostrou que, entre 2004 e 2006, as UCs evitaram sozinhas cerca de 37% do desmatamento que teria ocorrido na Amazônia, mesmo em um período de intensa pressão. Ou seja, proteger floresta passa, necessariamente, por

valorizar e fortalecer essas áreas. Elas não são apenas limites no mapa, mas pilares fundamentais para a conservação da Amazônia.

Dessa forma, esse artigo comparou a situação de preservação dessas áreas (UCs e TIs) nos três cenários simulados para o ano de 2100, a fim de reforçar a importância de políticas ambientais mais rígidas a longo prazo. Na tabela 2, observamos que os três cenários modelados mostram diferenças significativas entre si nos anos projetados (figura 6).

Tabela 2—Unidades de Conservação (UCs) na Amazônia por uso da terra, cenário final (2100).

Cenário	Vegetação	Pastagem	Agricultura	Mancha Urbana
Otimista	1.052.266,53	14.398,67	632,86	2.223,62
Tendencial	955.093,11	47.050,26	1.668,51	3.701,54
Pessimista	874.752,01	90.041,97	2.996,06	5.640,78

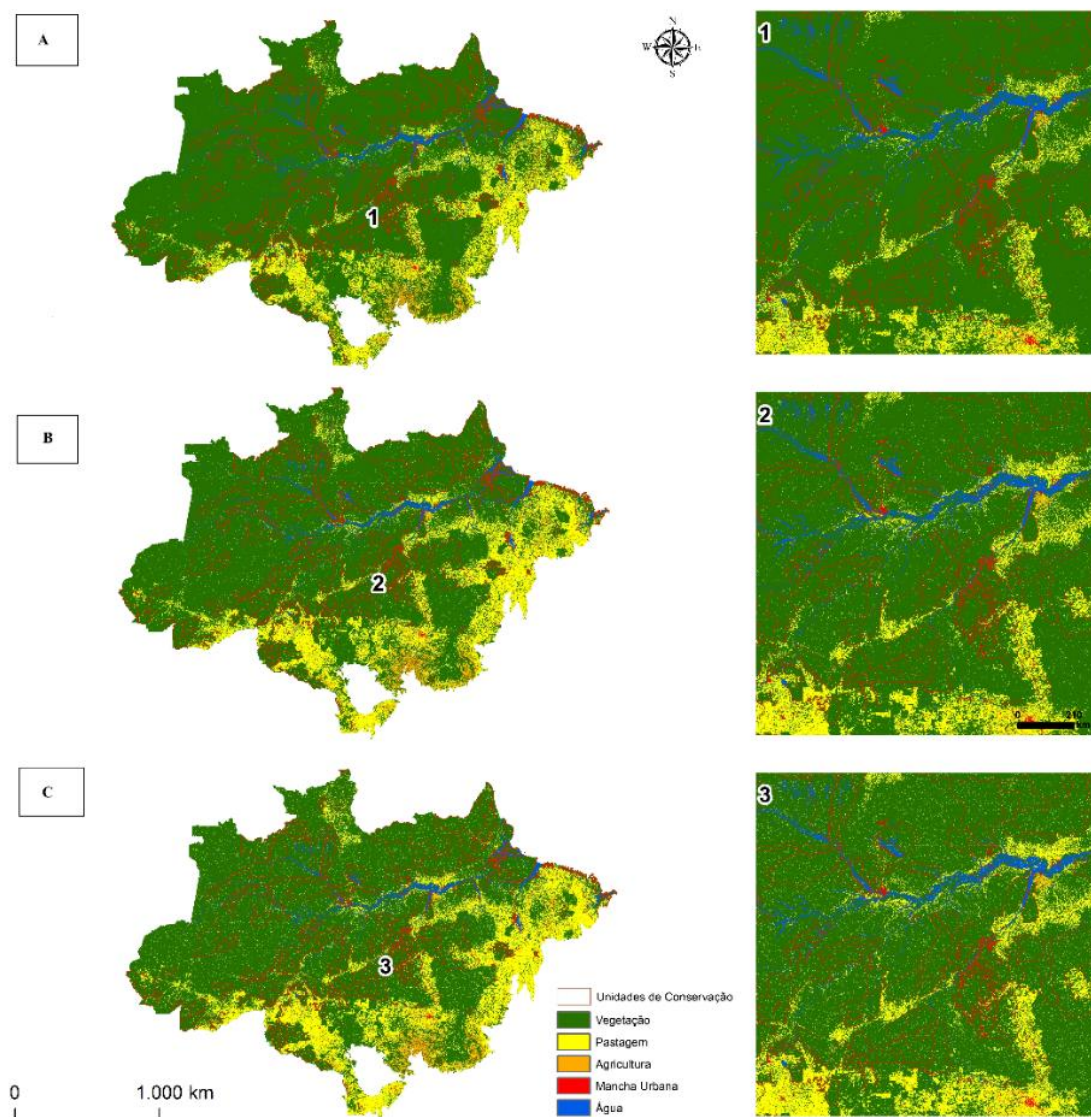
Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados de modelagem.

No cenário Otimista, as Unidades de Conservação (UCs) mantêm 1.052.267 km² de vegetação nativa, o que representa a maior área preservada entre os três cenários. A ocupação antrópica é bastante limitada: as pastagens somam 14.399 km², a agricultura ocupa apenas 633 km² e as manchas urbanas 2.224 km².

No cenário Tendencial, a vegetação nativa se reduz para 955.093 km², uma perda de aproximadamente 9,3% em relação ao cenário Otimista. Simultaneamente, há um aumento expressivo das pastagens (47.050 km², crescimento de mais de três vezes), além do avanço da agricultura para 1.669 km² e da mancha urbana para 3.702 km². Esse cenário representa uma pressão crescente das atividades econômicas, indicando enfraquecimento parcial da governança ambiental e maior influência das dinâmicas do entorno sobre o interior das UCs.

No cenário Pessimista, o quadro é ainda mais preocupante: a vegetação nativa cai para 874.752 km², o que representa uma perda de cerca de 16,9% em relação ao cenário Otimista. As pastagens aumentam mais de seis vezes, atingindo 90.042 km², a agricultura avança significativamente para 2.996 km², e as manchas urbanas crescem para 5.641 km².

Figura 6 – Unidades de Conservação e Uso e Cobertura da Terra na Amazônia. A = Otimista; B = Tendencial; e C = Pessimista.



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados de modelagem.

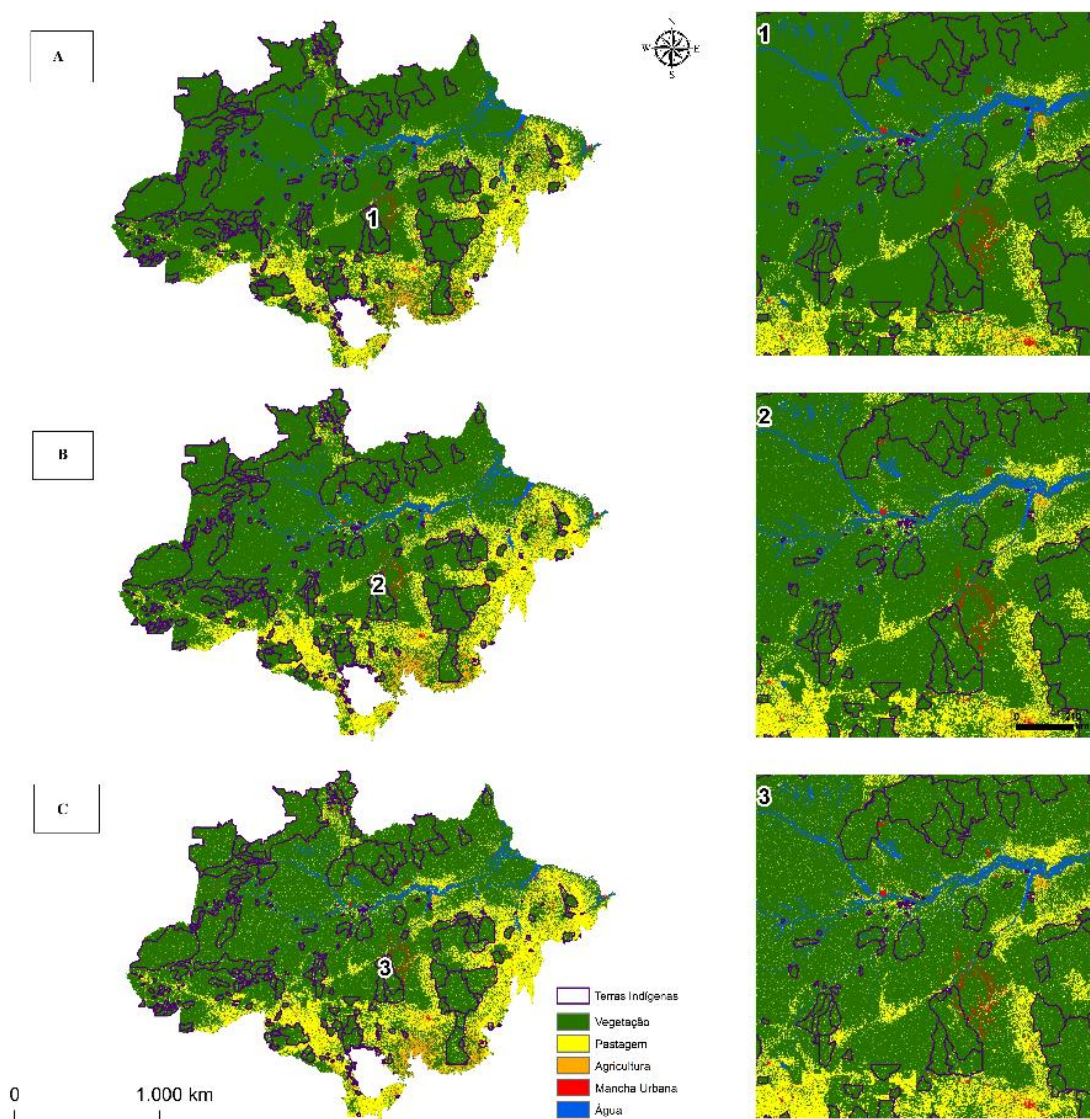
As áreas de Terras Indígenas (TIs) também seguiram padrões distintos em cada cenário, reforçando que, em contextos com políticas mais restritivas, as TIs sofrem menores impactos das mudanças antrópicas ao longo dos anos (Tabela 3). No cenário Otimista, as TIs mantêm 1.061.801 km² de vegetação nativa, com baixo nível de ocupação antrópica: pastagens somam 12.977 km², a agricultura ocupa apenas 679 km² e as manchas urbanas estão restritas a 1.300 km².

No cenário Tendencial, a vegetação nativa é reduzida para 990.512 km², o que representa uma perda de 6,7% em relação ao cenário Otimista. Ao mesmo tempo, as pastagens aumentam para 35.566 km² (quase o triplo), a agricultura sobe para 1.615 km²

e as manchas urbanas para 2.738 km². Esse cenário evidencia a crescente vulnerabilidade das TIs, especialmente daquelas situadas em regiões de forte pressão externa, como áreas com proximidade de estradas ou em zonas de expansão agropecuária.

No cenário Pessimista, os impactos tornam-se ainda mais pronunciados: a vegetação nativa cai para 919.151 km², ou seja, uma perda de 13,4% em relação ao cenário Otimista. As pastagens se expandem intensamente, atingindo 61.552 km², e a agricultura ocupa 2.898 km², mais de quatro vezes o valor observado no cenário Otimista. As manchas urbanas também crescem fortemente, alcançando 4.296 km².

Figura 7 – Terras Indígenas e Uso e Cobertura da Terra na Amazônia. A = Otimista; B = Tendencial; e C = Pessimista.



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados de modelagem

Tabela 3 – Terras Indígenas (TIs) na Amazônia por uso da terra, cenário final (2100).

Cenário	Vegetação	Pastagem	Agricultura	Mancha Urbana
Otimista	1.052.266,53	14.398,67	632,86	2.223,62
Tendencial	955.093,11	47.050,26	1.668,51	3.701,54
Pessimista	874.752,01	90.041,97	2.996,06	5.640,78

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados de modelagem.

Esses resultados evidenciam que tanto as Unidades de Conservação quanto as Terras Indígenas permanecem como áreas estratégicas para a conservação da Amazônia, mas apresentam vulnerabilidades diferenciadas. Enquanto as UCs, por sua maior extensão, concentram perdas absolutas mais expressivas em termos de vegetação nativa, as TIs mostram-se relativamente mais resilientes, sobretudo no cenário Otimista. Contudo, nos cenários de menor governança, ambas sofrem pressões significativas, com destaque para o avanço acelerado da pastagem e da mancha urbana, que chegam a crescer mais de cinco vezes em algumas projeções. Essa tendência reforça que, embora sejam instrumentos fundamentais de proteção territorial, a eficácia das UCs e TIs depende diretamente da manutenção de políticas ambientais robustas e da capacidade institucional de evitar a intensificação de usos antrópicos em seus limites e zonas de influência.

4. Conclusão

Estudos sobre modelagens da dinâmica do Uso e Cobertura da Terra para simulação de cenários futuros tem se mostrado uteis e relevantes para compreender o processo de expansão do uso antrópico e da redução de áreas remanescentes de vegetação. Nos últimos anos, tem crescido o número de estudos voltados para essa temática, com destaque para aqueles que investigam o desmatamento em diferentes regiões do país, como na Amazônia (SOARES-FILHO et al., 2006; XIMENES et al., 2008), no Cerrado (FERREIRA et al., 2012) e no sul do Brasil (BENEDETTI, 2010).

No que diz respeito a modelagem da expansão de diferentes usos do bioma Amazônico, utilizando dados recentes como base, ainda são poucos artigos científicos publicados, principalmente com um período de análise tão extenso (2030 a 2100).

Diante da relevância global do bioma amazônico e das transformações recentes na legislação e nas políticas de governança ambiental na última década, os impactos socioeconômicos e ecológicos decorrentes da expansão desordenada de pastagens e áreas agrícolas (especialmente em zonas legalmente protegidas) evidenciam a importância desta pesquisa. Os resultados contribuem não apenas para o avanço do conhecimento acadêmico, mas também como subsídio para a formulação de estratégias de gestão territorial mais sustentáveis e eficazes para a região.

No que diz respeito aos modelos simulados, observamos uma dinâmica distinta entre cada cenário projetado (conservador, moderado e pessimista), refletindo diferentes trajetórias possíveis para o uso da terra na Amazônia ao longo do tempo. O cenário conservador aponta para uma maior contenção da conversão de áreas naturais, mantendo cerca de 3.472.511 km² de vegetação até 2100. Já o cenário moderado reduz essa área para aproximadamente 3.289.378 km², enquanto o cenário pessimista apresenta a maior perda, com apenas 3.163.984 km² de vegetação remanescente ao final do período analisado.

Em contrapartida, a expansão de áreas destinadas à pastagem e agricultura é significativamente maior nos cenários menos restritivos. No cenário pessimista, a pastagem alcança 879.401 km² e a agricultura ultrapassa 88.000 km² em 2103, enquanto no conservador essas classes ocupam, respectivamente, 582.982 km² e 73.946 km². A mancha urbana também cresce substancialmente, chegando a 28.068 km² no cenário pessimista, mais que o dobro do registrado nos anos iniciais da simulação. Esses resultados reforçam o papel determinante das políticas públicas e dos instrumentos de ordenamento territorial na definição dos rumos do bioma, evidenciando que a escolha entre conservação e degradação dependerá diretamente das decisões tomadas no presente.

Além disso, este estudo apresenta uma contribuição metodológica relevante ao desenvolver um script em linguagem Python, que possibilita uma interface mais flexível e interativa para a construção dos cenários de uso e cobertura da terra. A proposta integra os mesmos fundamentos teóricos e operacionais empregados por plataformas consolidadas na literatura, como o Dinâmica EGO e o módulo Land Change Modeler do TerrSet, porém com maior liberdade de personalização e transparência nos processos. Essa abordagem permite a automatização das etapas de calibração, simulação e extração de resultados, promovendo maior reprodutibilidade e adaptabilidade do modelo para diferentes escalas e contextos territoriais. Trata-se, portanto, de um avanço técnico que

amplia as possibilidades de aplicação da modelagem espacial em estudos voltados à projeção de cenários futuros e ao suporte ao planejamento ambiental.

Referências bibliográficas

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Região Hidrográfica Amazônica. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/as-12-regioes-hidrograficas-brasileiras/amazonica>. Acesso em: 5 maio 2025.

AZEVEDO-RAMOS, Claudia; LOPES, Alexandre; PERES, Carlos A. Protected areas in the Brazilian Amazon: challenges and opportunities for conservation. *Biodiversity and Conservation*, v. 29, p. 615–634, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01767-1>

FEARNSIDE, Philip M. Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras. *Estudos Avançados*, v. 29, n. 84, p. 167–185, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142015000200011>

FERREIRA, Leandro V. et al. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 19, n. 53, p. 157–166, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100010>

FLORES, Bernardo M. et al. Critical transitions in the Amazon Forest system. *Nature*, v. 626, p. 555–562, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06948-5>

FUNBIO. O papel das áreas protegidas da Amazônia brasileira na conservação e uso sustentável da biodiversidade. Fundação Grupo Boticário / WWF-Brasil / IBAMA / MMA, 2018. Disponível em: <https://www.funbio.org.br>. Acesso em: 12 jun. 2025.

HEISTERMANN, Maik; MÜLLER, Christoph; LAMARQUE, Paul. Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modeling. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 114, p. 141–158, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.015>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022: População e Domicílios - Primeiros Resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br>. Acesso em: 5 maio 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil: compatibilidade entre os mapas de vegetação e as áreas dos biomas. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Base de dados de unidades de conservação do Brasil. Brasília: ICMBio, 2024.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Monitoramento do desmatamento da floresta Amazônica brasileira por satélite: PRODES – 2023. São José dos Campos: INPE, 2023. Disponível em: <https://www.inpe.br>. Acesso em: 5 maio 2025.

ISA – INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. Terras Indígenas no Brasil. São Paulo: ISA, 2024. Disponível em: <https://terrasindigenas.org.br>. Acesso em: 12 jun. 2025.

MAPBIOMAS. Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil: 1985–2023. Projeto MapBiomass, 2024. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 5 maio 2025.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação – CNUC. Brasília: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/areas-protegidas>. Acesso em: 5 maio 2025.

MONGABAY. Protected areas and Indigenous territories hold nearly 60% of the Amazon's above-ground carbon. Mongabay News, 2025. Disponível em: <https://news.mongabay.com>. Acesso em: 12 jun. 2025.

NOBRE, Carlos A. et al. 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 (PNAS)*, v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>

PAINEL CIENTÍFICO PARA A AMAZÔNIA. Síntese de políticas públicas: ciência para uma Amazônia sustentável. 2024. Disponível em: <https://www.theamazonwewant.org>. Acesso em: 12 jun. 2025.

RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. Folhas SB.20 Porto Velho; SC.20 Rio Branco. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), Projeto RADAMBRASIL, 1983.

URUEÑA, Ricardo. Modelación espacial de escenarios futuros del uso del suelo. *Revista Geográfica Digital*, v. 26, p. 15–28, 2019.

WALKER, Robert et al. Forest conservation in Indigenous territories and protected areas in the Brazilian Amazon. *Scientific Reports*, v. 13, p. 1–12, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37583-z>

XU, Jingwen et al. Future scenarios of land-use change in the Amazon: a modeling approach. *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 5, 2021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf357>

Capítulo 3 – CENÁRIOS FUTUROS DE USO E COBERTURA DA TERRA NO BIOMA CERRADO: Simulações espaciais e ameaças às áreas protegidas

Resumo: O Cerrado, segundo maior bioma da América do Sul, é reconhecido como um hotspot global de biodiversidade, exercendo papel essencial na regulação hídrica e climática deste continente. Contudo, a rápida expansão agropecuária e a insuficiência de mecanismos de proteção têm resultado em taxas alarmantes de perda de vegetação nativa. Compreender as possíveis trajetórias futuras desse bioma, em face de sua conectividade com a Amazônia, é fundamental para orientar políticas públicas e estratégias de uso sustentável do território. Este estudo analisou cenários futuros de uso e cobertura da terra no bioma Cerrado até 2100, utilizando um modelo espacial desenvolvido em Python com base em Cadeias de Markov, Pesos de Evidência e métricas de vizinhança. As taxas de desmatamento foram calibradas a partir de dados do PRODES, definindo três cenários distintos: otimista (20% abaixo da média recente, 6.512,6 km²/ano), tendencial (8.140,8 km²/ano) e pessimista (11.551 km²/ano, equivalente aos anos de pico). Os resultados mostram que a trajetória do Cerrado dependerá diretamente da efetividade das políticas ambientais. No cenário otimista, há desaceleração da perda de vegetação nativa e manutenção de corredores ecológicos mais extensos, favorecendo a conectividade. No cenário tendencial, os padrões recentes de conversão se mantêm, resultando em perdas expressivas, mas ainda com preservação parcial de áreas estratégicas. Já no pessimista, ocorre forte fragmentação e redução crítica das áreas contínuas de vegetação, sobretudo nas bordas de frentes agropecuárias. Entre 2030 e 2050 concentram-se as maiores perdas: -2.707 km²/ano no cenário otimista, -6.342 km²/ano no tendencial e -15.711 km²/ano no pessimista. Após 2050, as taxas diminuem em todos os cenários, não por menor pressão antrópica, mas pela escassez de áreas remanescentes para conversão. Em 2100, a vegetação nativa se reduz a cerca de 1,3 a 1,7 milhões km² (47–61% da área original), enquanto pastagens e agricultura avançam de forma desigual, segundo a intensidade do cenário. Conclui-se que a continuidade das trajetórias recentes coloca em risco a resiliência ecológica do Cerrado, reforçando a necessidade de políticas mais efetivas de conservação, expansão de áreas protegidas e mecanismos de controle do desmatamento, em linha com outros trabalhos de referência sobre o bioma.

Palavras-chave: Desmatamento modelagem espacial; cenários futuros; políticas públicas; desmatamento; Python.

1. Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de grãos e carne do mundo (FAO, 2010), e o Cerrado se consolidou como uma das principais regiões agrícolas globais (OLIVEIRA et al., 2019). Esse processo foi impulsionado por condições topográficas favoráveis, com relevo predominantemente plano ou suavemente ondulado, pela aptidão dos solos à mecanização e pelos baixos custos da terra (LAPOLA et al., 2014; KLINK; MACHADO, 2005).

Com aproximadamente 2 milhões de km², o Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil em extensão territorial, ficando atrás apenas da Amazônia. Sua localização estratégica, no centro do país, o conecta principalmente a dois biomas: a Caatinga, ao nordeste, e a Amazônia, ao norte e noroeste.

O bioma é considerado o *hotspot* mais ameaçado entre as savanas tropicais do mundo (SILVA et al., 2002). Atualmente, apenas 43% da sua área é de vegetação nativa, enquanto cerca de 47% já foi convertida para uso agropecuário (MAPBIOMAS, 2024).

Historicamente, a taxa de desmatamento no Cerrado tem superado a registrada na Amazônia brasileira, sendo a expansão agrícola, sobretudo nas últimas três décadas, o principal motor dessas transformações na paisagem (COLMAN et al., 2024).

A conversão do Cerrado em uma das maiores fronteiras agropecuárias do mundo está diretamente associada à expansão da soja e da pecuária extensiva, especialmente a partir dos anos 2000. A região concentra cerca de 60% da produção de soja do país, sendo o principal destino de investimentos do agronegócio brasileiro nas últimas décadas (GIBBS et al., 2015). Ademais, pesquisas recentes destacam que grande parte do desmatamento ocorre em conformidade com a legislação atual, evidenciando um modelo de uso do solo que combina legalidade formal com impactos socioambientais significativos (SOTERRONI et al., 2019).

A legislação ambiental em relação ao bioma Cerrado é menos restritiva ao se comparar com outros biomas do Brasil, a prova disso é o fato dele ser o bioma com a menor proporção de áreas legalmente protegidas no Brasil. Apenas cerca de 8,3% de sua extensão está inserida em Unidades de Conservação ou Terras Indígenas (BRASIL, 2023), número inferior às metas de conservação internacional e muito distante dos 47% do território que já foi convertido para atividades produtivas (MAPBIOMAS, 2024). Além disso, o bioma não é contemplado pela Moratória da Soja, instrumento que ajudou a reduzir o desmatamento na Amazônia (GIBBS et al., 2016), o que favorece o avanço contínuo da produção agrícola mesmo em áreas recém-desmatadas. Essa lacuna institucional reforça a vulnerabilidade do Cerrado frente às pressões do mercado global e à ausência de políticas públicas específicas e eficazes de conservação.

Considerando esse contexto de intensas pressões antrópicas e baixa representatividade em áreas legalmente protegidas, torna-se urgente compreender as dinâmicas territoriais futuras no Cerrado. Este estudo busca simular cenários de uso e cobertura da terra até 2103 para o cerrado, por meio de modelagem espacial preditiva, com foco especial sobre as Terras Indígenas e Unidades de Conservação. A análise permite identificar áreas mais suscetíveis à conversão antrópica e contribui para o planejamento territorial orientado à conservação.

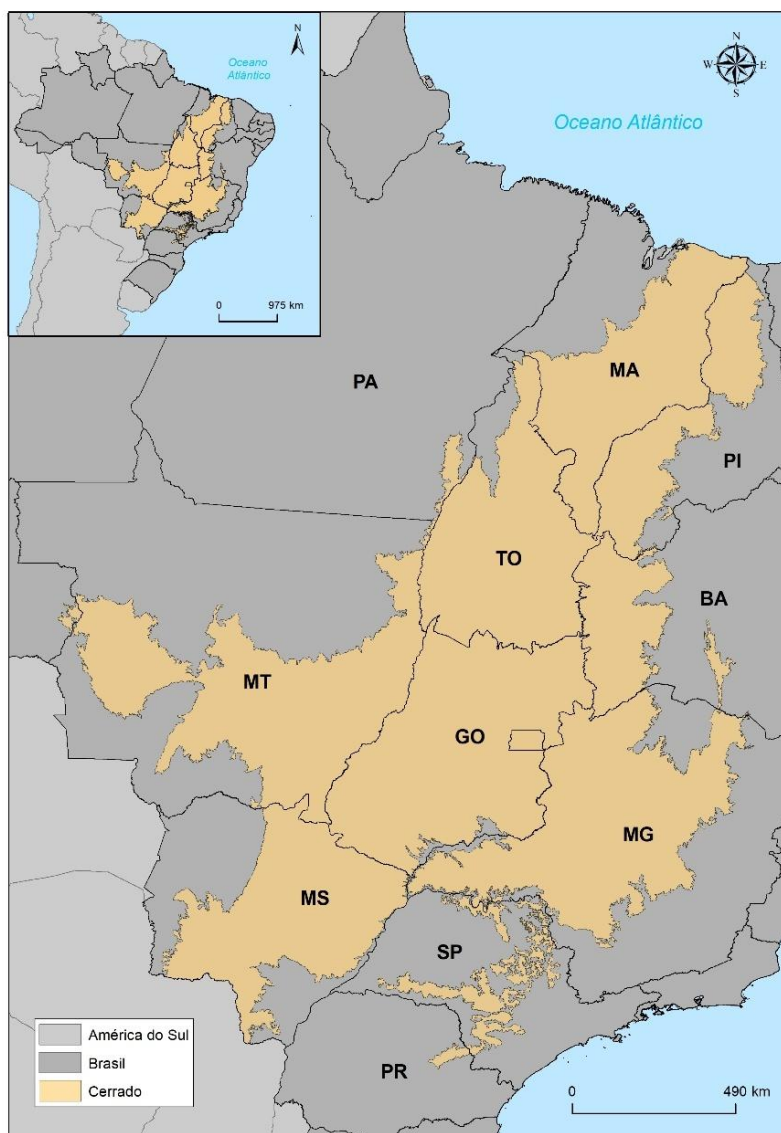
2. Materiais e métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo (figura 1) engloba todo o bioma Cerrado, incluindo áreas em diferentes estados do país: Goiás (GO), Tocantins (TO), Bahia (BA), Maranhão (MA),

Piauí (PI), Mato Grosso (MT), Mato Grosso do Sul (MS), Minas Gerais (MG), São Paulo (SP) e o Distrito Federal (Brasília).

Figura 1: Mapa de localização do bioma Cerrado.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados do IBGE (2023).

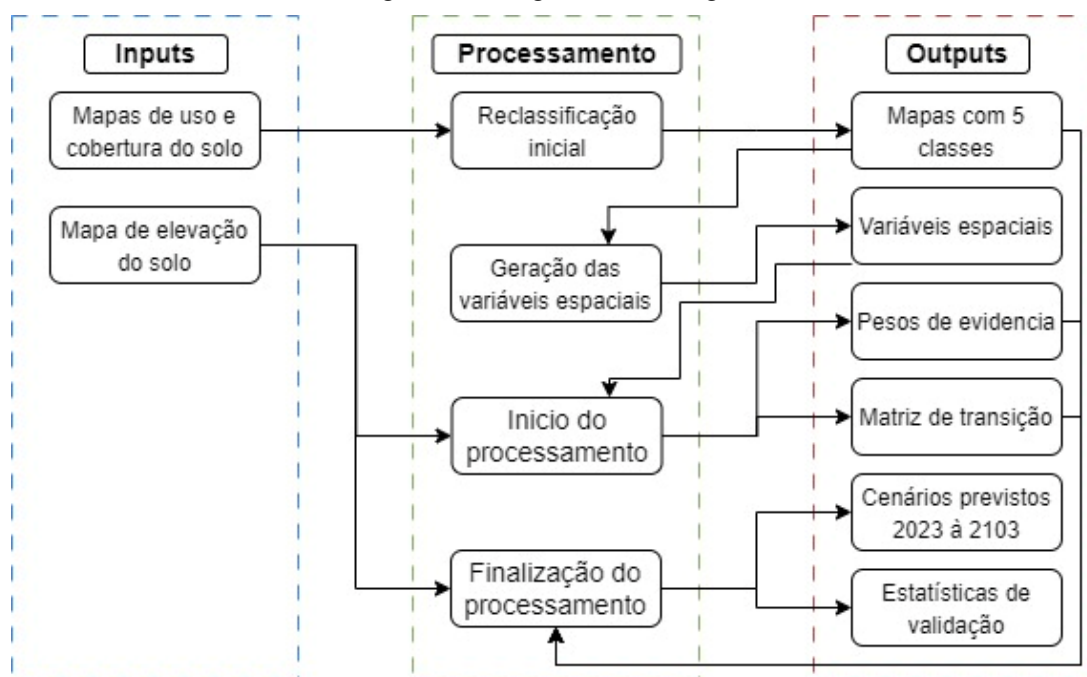
O Cerrado possui clima tropical sazonal, com duas estações bem definidas (uma seca e outra chuvosa) e apresenta vegetação predominantemente savânica, composta por formações de campo aberto, arbustos e árvores tortuosas. Os solos predominantes são geralmente ácidos e de baixa fertilidade natural. O bioma é reconhecido como um hotspot mundial de biodiversidade, devido à elevada riqueza de espécies endêmicas e ao alto grau de ameaça, com mais de 50% de sua vegetação original já convertida para usos antrópicos (SANO et al., 2019).

Além da expressiva conversão de áreas naturais, o Cerrado abriga parte das principais bacias hidrográficas do Brasil, como as bacias do Tocantins-Araguaia, São Francisco, Paraná e Parnaíba, o que lhe confere papel central na regulação hídrica nacional. Sua densa rede de drenagem, associada à alta variabilidade climática e à expansão das atividades agropecuárias, torna o bioma particularmente sensível às mudanças no uso e cobertura da terra, aspecto essencial para a compreensão e a modelagem dos cenários ambientais aqui propostos.

2.2 Fluxograma metodológico

A metodologia empregada neste estudo pode ser compreendida em quatro etapas principais: aquisição dos dados, reclassificação e geração de variáveis espaciais, modelagem preditiva e, por fim, validação dos resultados. A Figura 2 apresenta um fluxograma esquemático com o detalhamento de cada uma dessas etapas, permitindo uma visão geral do processo metodológico adotado, a fim de compreender melhor cada etapa adotada. Essa metodologia tem como base a mesma adotada e criada por Frazão et. al. (2025), no artigo Capítulo 2 desta tese.

Figura 2 – Fluxograma metodológico



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

2.3 Base de dados

De acordo com Miziara e Ferreira (2008), as transformações no uso e na cobertura da terra no bioma Cerrado estão fortemente relacionadas a atributos do solo, como a topografia, a fertilidade natural e a localização geográfica, especialmente em relação à proximidade de centros consumidores ou produtores. Assim, determinadas áreas tornam-se mais ou menos propensas a serem incorporadas às atividades produtivas, a depender do grau de compatibilidade com essas variáveis, tanto naturais quanto antrópicas. Com base nesse estudo, foram selecionadas algumas bases de dados a fim de colaborar no modelo empregado.

Dessa forma, as bases de dados utilizadas neste estudo estão listadas a seguir acompanhadas dos procedimentos analíticos correspondentes.

1. **Mapa de uso da terra** (estado inicial da paisagem do bioma, sendo o T1 e T2 e T3). Optou-se pelo mapa de uso e cobertura da coleção 9 do MapBiomas, que se constitui como o maior acervo de dados de uso dos biomas brasileiros, possuindo dados de 1986 a 2023. A Coleção 9 oferece um mapeamento para o Cerrado, com acurácia global de 90% no Nível 1 e 85 % no Nível 2 (MapBiomas, 2024). Estes dados, possuem uma resolução espacial de 30 metros, e são gerados a partir da análise de séries temporais de imagens Landsat, utilizando classificadores automáticos baseados em aprendizado de máquina e validação com amostras de campo. A classificação temática é organizada em seis grandes classes de uso e cobertura da terra e cada uma delas é desdobrada em subclasses, permitindo a identificação mais precisa dos elementos presentes em cada pixel, como pastagem, floresta, área urbana consolidada, entre outros. Dessa forma, foi utilizado os dados para a área do bioma Cerrado, para os anos de 2003, 2013 e 2023.
2. **Declividade.** Foi derivada a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado com base nas imagens de altimetria da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Para o cálculo, aplicou-se uma estatística de vizinhança, utilizando o desvio padrão em uma matriz 3x3, o que permitiu capturar não apenas a inclinação do terreno, mas também a variação dessa inclinação entre os pixels adjacentes. Esse procedimento possibilitou identificar e destacar as áreas com menor desvio padrão da altitude, representando regiões mais planas, e aquelas com maior variação altimétrica, indicando terrenos com maior declividade.

3. **Mapa de estradas.** Foi obtido a partir da base de dados do OpenStreetMap (OSM), uma plataforma colaborativa que reúne informações geoespaciais atualizadas por usuários em todo o mundo. Foram extraídas as feições lineares correspondentes a rodovias pavimentadas, não pavimentadas e em construção, recortadas conforme o limite do bioma Cerrado. Essa base se destaca pela ampla cobertura, constante atualização e riqueza de atributos, permitindo análises detalhadas da infraestrutura de transporte na região.
4. **Mapa de Hidrografia.** Disponibilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), este mapa representa os cursos d'água do país, conforme a base hidrográfica oficial do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), em escala de 1:1.000.000. As feições hidrográficas foram recortadas segundo o limite do bioma Cerrado, abrangendo rios principais, afluentes e demais trechos da rede de drenagem.

2.4 Reclassificação

Com o objetivo de simplificar a modelagem, as classes originais do MapBiomias foram reclassificadas em cinco categorias principais: vegetação natural, agricultura, pastagem, área urbana e corpos d'água. Essa reclassificação permite um melhor entendimento das transições de uso e cobertura da terra, reduzindo a complexidade do modelo e diminuindo o esforço computacional sem comprometer a representatividade dos processos espaciais observados (ALAMANOS, 2023).

Para a reclassificação dos dados de uso e cobertura da terra, obtidos através da plataforma MapBiomias, utilizou-se a ferramenta *Reclassify* do ArcGIS Pro. Essa ferramenta permite alterar os valores de cada pixel em um raster de acordo com um padrão pré-estipulado, facilitando as futuras análises e interpretação dos dados. Dessa forma, a reclassificação foi realizada convertendo todas as classes originais do MapBiomias e os novos valores atribuídos.

2.5 Variáveis espaciais

Com o objetivo de aprimorar a capacidade explicativa do modelo preditivo e aumentar sua relevância analítica, foram incorporadas variáveis espaciais que representam a distância em relação às principais classes de uso antrópico: agricultura,

pastagem, áreas urbanas, estradas e hidrografia. A inclusão dessas variáveis permite ao modelo capturar relações espaciais mais complexas no território, reconhecendo fatores externos que influenciam as transições entre as classes de uso e cobertura da terra.

Tomando como base o mapa de uso e cobertura da terra referente ao ano de 2022 e os mapas de declividade, estradas, hidrografia, foi utilizada a ferramenta *Euclidean Distance* do software ArcGIS para gerar rasters contínuos de distância para cada uma das classes selecionadas. Esses rasters foram posteriormente reclassificados em uma escala de 1 a 10, na qual valores mais altos representam maior proximidade às feições antrópicas, enquanto os valores mais baixos indicam maior distância.

A reclassificação em uma escala comum facilita a padronização das variáveis, promovendo a integração eficiente ao modelo e permitindo maior escalabilidade. Essa abordagem elimina a necessidade de ajustes individuais entre diferentes tipos de variáveis, além de contribuir para a correta atribuição de pesos pelo modelo, conforme os princípios da inferência bayesiana.

2.6 Modelagem das mudanças e simulação de cenários futuros

A simulação dos cenários futuros de uso e cobertura da terra foi realizada por meio de um modelo híbrido, que integra Pesos de Evidência (WoE), fundamentado no Teorema de Bayes, com Autômatos Celulares acoplados a Cadeias de Markov (CA-Markov). Essa abordagem permite representar tanto a dimensão estatística quanto a estrutura espacial das transições entre classes de uso e cobertura da terra, sendo amplamente empregada em estudos de mudanças ambientais com foco em dinâmicas antrópicas (MARKO et al., 2016; PEDROSA; CÂMARA, 2002).

1. Cálculo dos Pesos de Evidência (WoE)

A etapa inicial do processo consiste na aplicação do modelo de Pesos de Evidência, conforme proposto por Bonham-Carter (1994), com base na seguinte formulação bayesiana (Eq. 08):

$$W^+ = \ln \left(\frac{P(B|A)}{P(B|\neg A)} \right) \quad \text{e} \quad W^- = \ln \left(\frac{P(\neg B|A)}{P(\neg B|\neg A)} \right)$$

Eq. 08

Onde:

- W^+ representa o peso de evidência favorável à ocorrência da transição;
- W^- representa o peso contrário à ocorrência da transição;
- $P(B|A)$ é a probabilidade condicional da transição B ocorrer na presença da variável A;
- $P(B|\neg A)$ é a probabilidade de a transição ocorrer na ausência da variável;
- \ln é o logaritmo natural.

Esses pesos foram calculados a partir de mapas reclassificados das variáveis explicativas (ex: declividade, distâncias às classes antrópicas) em valores de 1 a 10. A reclassificação padroniza a influência das variáveis, promovendo a comparabilidade entre elas.

2. Geração da Matriz de Transição

Com base em dois mapas de uso e cobertura da terra espaçados em 10 anos, é construída uma matriz de transição de Markov, que estima a probabilidade de mudança entre as classes no intervalo considerado. A fórmula geral é (Eq. 09):

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}}$$

Eq. 09

Onde:

- P_{ij} é a probabilidade de transição da classe i para a classe j;
- n_{ij} é o número de pixels que mudaram de i para j;
- A soma é realizada sobre todas as classes j.

Essa matriz representa o componente temporal do modelo e serve como base para a simulação futura.

3. Simulação com Autômatos Celulares de Markov (CA-Markov)

A simulação espacial é realizada por meio da integração da matriz de transição com Autômatos Celulares, que consideram o estado dos pixels vizinhos para definir a

transição de cada célula. A influência espacial é avaliada a partir de uma janela de vizinhança 7×7 , segundo a lógica (Eq. 10):

$$P_{ij}(x, y) = P_{ij} \cdot f(N_{xy})$$

Eq. 10

Onde:

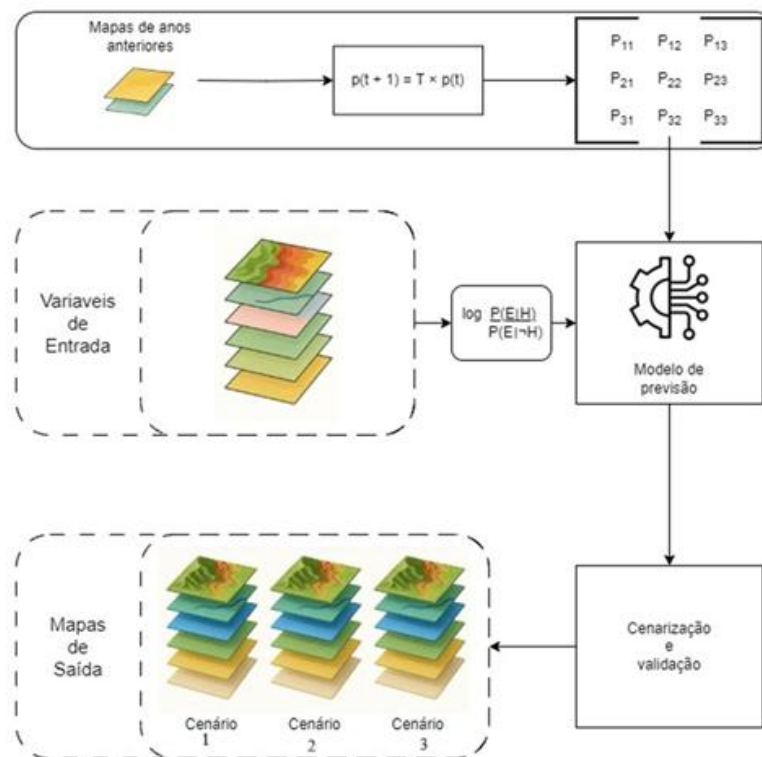
- $P_{ij}(x,y)$ é a probabilidade ajustada de transição para o pixel (x,y) ;
- $f(N_{xy})$ é uma função de influência dos vizinhos (número ou predominância de determinada classe na vizinhança).

O Cellular Automata Markov (CAM), é um dos modelos mais confiáveis e utilizados por pesquisadores para uma análise espacial e temporal das mudanças de uso e cobertura da terra (Marko et al., 2016). Segundo Pedrosa e Câmara (2002), as cadeias de Markov são modelos matemáticos para descrever processos estocásticos. Integrando a matriz de transição com a abordagem de Autômatos Celulares, o modelo incorpora a influência espacial dos vizinhos em cada célula. Essa integração aumenta o realismo espacial das simulações, capturando padrões de mudança que dependem da configuração espacial das classes.

6. Previsões até 2100.

O modelo resultante (figura 3) foi aplicado para gerar previsões decenais do uso e cobertura da terra até o ano de 2103, totalizando oito mapas preditivos (de 2030 a 2100), junto com um de validação (2023). Essa projeção permite visualizar possíveis cenários futuros e subsidiar o planejamento territorial.

Figura 3 – Processos da simulação dos cenários



Fonte: Autores (2025).

O fluxo do processo inicia com a leitura do mapa de uso e cobertura da terra do ano mais recente disponível, juntamente com as variáveis explicativas necessárias para o cálculo dos pesos de evidência, que são armazenados em uma variável global para uso posterior. Em seguida, inicia-se um loop que percorre pares de mapas em intervalos de 10 anos (por exemplo, 2000 e 2010, depois 2010 e 2020, e assim por diante). Para cada par, calcula-se a matriz de transição e, em seguida, cada pixel é analisado individualmente, considerando sua categoria atual e os valores dos pixels em uma janela de 7×7 ao redor.

Nesse ponto, aplica-se o Índice de Pressão de Desmatamento (IPD), responsável por ajustar as probabilidades de transição com base na influência exercida pela vizinhança e no contexto de pressão antrópica definido para cada cenário. O IPD foi padronizado em uma escala de 0 a 10, em que valores próximos de 0 indicam ausência ou baixa pressão e valores próximos de 10 representam pressão muito alta.

A calibração do IPD foi realizada a partir da série histórica de desmatamento do Cerrado (PRODES/INPE). Inicialmente, foram definidas três taxas de referência: (i) taxa tendencial, obtida pela média recente (2018–2022), representando o padrão atual; (ii) taxa

otimista, equivalente a 80% da taxa tendencial, simulando maior controle e efetividade de políticas ambientais; e (iii) taxa pessimista, baseada na média dos anos de pico de desmatamento (2013, 2014, 2015 e 2022), refletindo forte expansão da fronteira agropecuária. Essas taxas foram então normalizadas para a escala do IPD e associadas a limites superiores distintos para cada cenário, que modulam a influência da vizinhança na probabilidade de conversão da vegetação nativa (tabela 1).

Tabela 1 – Taxas de desmatamento do Cerrado utilizadas para calibrar os cenários de pressão

Cenário	Descrição	Base de cálculo	Taxa anual (km ² /ano)	Anos de referência (PRODES)
Otimista	Redução percentual da taxa tendencial, simulando políticas ambientais efetivas e maior controle	80% da média recente	6.512,60	2018 – 2022 (ajustada)
Tendencial	Manutenção da taxa média recente	Média 2018–2022	8.140,80	2018 – 2022
Pessimista	Taxas de anos de pico, refletindo forte expansão da fronteira agropecuária	Média dos anos de pico	11.551,00	2013, 2014, 2015, 2022

Fonte: PRODES/INPE (2022)

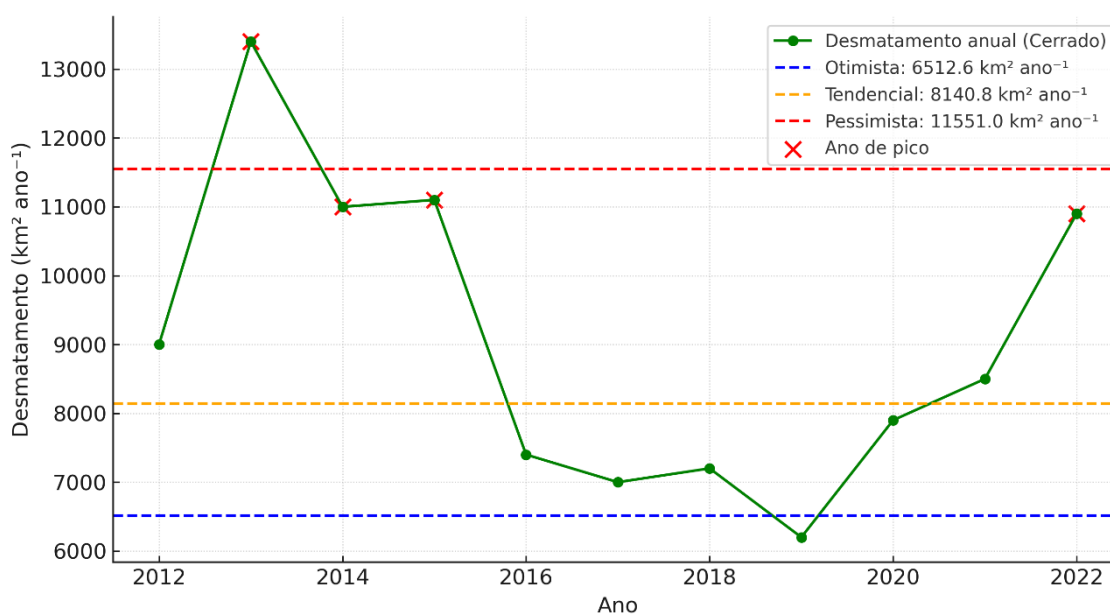
Após essa etapa, a influência das variáveis explicativas (declividade, distância a pastagem, agricultura, áreas urbanas, hidrografia e estradas) é incorporada para ajustar a probabilidade de transição para cada uma das classes disponíveis e estimar a provável transição do pixel em análise. Concluído o processamento, o novo mapa é salvo e o ciclo se repete para o próximo par de anos, permitindo a geração sequencial de mapas preditivos ao longo do tempo.

O IPD é fundamentado no conceito de matrizes de pesos espaciais, amplamente utilizadas para representar a dependência entre unidades territoriais adjacentes em estatística espacial (ZHOU et al., 2008; GETIS, 2004). Nessas matrizes, cada elemento w_{ij} expressa o grau de relação entre as localidades i e j , sendo um recurso essencial para modelar autocorrelação e efeitos espaciais. Em termos práticos, valores mais altos de IPD indicam forte influência de áreas preservadas sobre seu entorno, favorecendo a conectividade ecológica e reduzindo a probabilidade de conversão. Já valores mais baixos indicam menor influência das áreas vizinhas, favorecendo processos de fragmentação e

maior vulnerabilidade à conversão. Essa lógica se aproxima dos efeitos de espalhamento espacial (spillover) discutidos por Zhang et al. (2023), que demonstram como o desmatamento em uma área pode influenciar negativamente áreas adjacentes.

Essa parametrização, calibrada com dados do PRODES, permite que o modelo capture padrões espaciais e temporais mais realistas, alinhando os resultados de simulação às tendências observadas no Cerrado nas últimas décadas.

Figura 4. Cenários de calibração do IPD baseados no PRODES – Cerrado.



Fonte: Elaboração autores.

2.7 Validação do modelo

Antes de gerar os cenários futuros, foi realizada uma etapa de validação do modelo. Para isso, foi simulado o mapa de 2023 com base nas transições observadas entre os anos de 2003 e 2013. O resultado foi comparado com o mapa real de 2023 para avaliar a acurácia do modelo.

Foram utilizados três métricas estatísticas: o índice de similaridade (Kappa), o erro médio absoluto (MAE) e o erro quadrático médio (RMSE) para avaliar a qualidade da previsão.

1- Erro Médio Absoluto (MAE – *Mean Absolute Error*) (Eq. 11):

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Eq. 11

Onde:

- y_i é o valor observado,
- \hat{y}_i é o valor predito,
- n é o número total de observações.

2- Erro Quadrático Médio (RMSE – Root Mean Square Error) (Eq. 12):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Eq. 12

Onde:

7. y_i é o valor observado para o pixel i ;
8. \hat{y}_i é o valor previsto para o pixel i ;
9. n é o número total de pixels avaliados.

Assim como o MAE, o RMSE mede o desvio entre valores observados e previstos, mas penaliza mais fortemente erros maiores devido à elevação ao quadrado. Com a validação apresentando resultados satisfatórios, prosseguiu-se com a geração dos cenários futuros de uso e cobertura da terra até 2103.

3- Acurácia

A acurácia é uma métrica amplamente utilizada para avaliar o desempenho de classificações temáticas, como mapas de uso e cobertura da terra. Ela representa a proporção de acertos do modelo em relação ao total de observações avaliadas, indicando o quão próximo os resultados da simulação estão da realidade observada ou do dado de referência. Trata-se de uma medida simples e direta, que resume a taxa global de

concordância entre os dados classificados e os dados de validação. Dessa forma, valores de acurácia superiores a 90% são considerados excelentes, entre 80% e 90% são bons, entre 70% e 80% são aceitáveis, e abaixo de 70% indicam baixa confiabilidade.

A acurácia global (A) é calculada a partir da matriz de confusão, utilizando a seguinte fórmula (Eq. 13):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ii}}{N}$$

Eq. 13

Onde:

- x_{ii} representa os valores na diagonal principal da matriz de confusão (os acertos para cada classe),
- N é o número total de amostras avaliadas,
- n é o número total de classes.

3. Resultados e Discussões

3.1 Validação dos modelos

A validação dos modelos de simulação espacial aplicados ao bioma Cerrado foi conduzida com base em três métricas de desempenho amplamente utilizadas: acurácia (accuracy), erro absoluto médio (MAE) e erro quadrático médio (MSE). Os resultados obtidos foram consistentes entre os três cenários analisados: Otimista, Tendencial e Pessimista, evidenciando a estabilidade estrutural do modelo frente às variáveis utilizadas.

A acurácia dos modelos alcançou 0,97, indicando que aproximadamente 97% das transições simuladas coincidiram com os padrões observados no período de calibração, refletindo elevada capacidade de representação da dinâmica espacial histórica. O erro absoluto médio foi de 0,04, representando uma discrepância média de 4% entre os valores previstos e os reais. Já o erro quadrático médio foi de 0,09, valor que penaliza

discrepâncias maiores e permanece dentro de uma faixa considerada adequada para modelos de simulação espacial de alta complexidade.

A homogeneidade dos resultados de validação entre os cenários indica que as variações na parametrização do Índice de Pressão de Desmatamento (IPD) afetam exclusivamente as projeções futuras, não comprometendo a capacidade do modelo de reproduzir o padrão espacial no período de referência. Esses resultados reforçam a robustez do modelo calibrado, validando sua aplicação para a geração de cenários de uso e cobertura da terra no Cerrado.

3.2 Mudanças de Uso e Cobertura da Terra de 2030 a 2100 em diferentes cenários.

Os cenários preditivos indicam dinâmicas contrastantes para o Cerrado no período de 2030 a 2100, refletindo diferenças tanto na intensidade da conversão da vegetação nativa quanto na expansão dos usos antrópicos. A Tabela 2 apresenta as áreas absolutas por classe de uso e cobertura da terra em cada cenário e ano, enquanto a Figura 5 ilustra a distribuição espacial dessas mudanças, evidenciando os padrões regionais de expansão e retração das diferentes classes.

No cenário Otimista, a vegetação nativa reduz-se de 973.101 km² em 2030 para 918.967 km² em 2050 e 855.532 km² em 2100. Apesar dessa perda, o bioma mantém 40% de cobertura natural ao final do período. A pastagem é o uso antrópico predominante, ocupando 556.140 km² em 2030 e atingindo 605.568 km² em 2100, seguida pela agricultura, que passa de 490.687 km² para 538.461 km² no mesmo intervalo. A expansão urbana é residual, com aumento de apenas 23.677 km² ao longo de todo o século. Esse cenário reflete avanços limitados sobre novas áreas e manutenção de mosaicos onde atividades agropecuárias coexistem com remanescentes de vegetação.

O cenário Tendencial apresenta redução mais intensa da vegetação, de 922.668 km² em 2030 para 795.818 km² em 2050 e 721.560 km² em 2100, restando 34% de cobertura natural. A pastagem predomina entre os usos antrópicos, crescendo de 582.901 km² para 676.656 km², enquanto a agricultura aumenta de 515.824 km² para 604.935 km². Nesse caso, a expansão das áreas produtivas é mais equilibrada entre pastagem e agricultura, sugerindo manutenção das dinâmicas atuais de conversão, com avanços sobre áreas de vegetação savânica e campestre em zonas de alta aptidão agrícola.

No cenário Pessimista, a vegetação nativa sofre redução acentuada: de 799.366 km² em 2030 para 485.149 km² em 2050 e 398.004 km² em 2100, correspondendo a apenas 18% do bioma. Ao final do período, a pastagem domina amplamente, alcançando 849.541 km², seguida pela agricultura com 763.479 km², o que equivale a 78% de todo o bioma. O avanço dessas duas classes representa substituição maciça da vegetação remanescente, restando áreas naturais concentradas em enclaves isolados, unidades de conservação permanentes ou regiões de menor viabilidade agrícola.

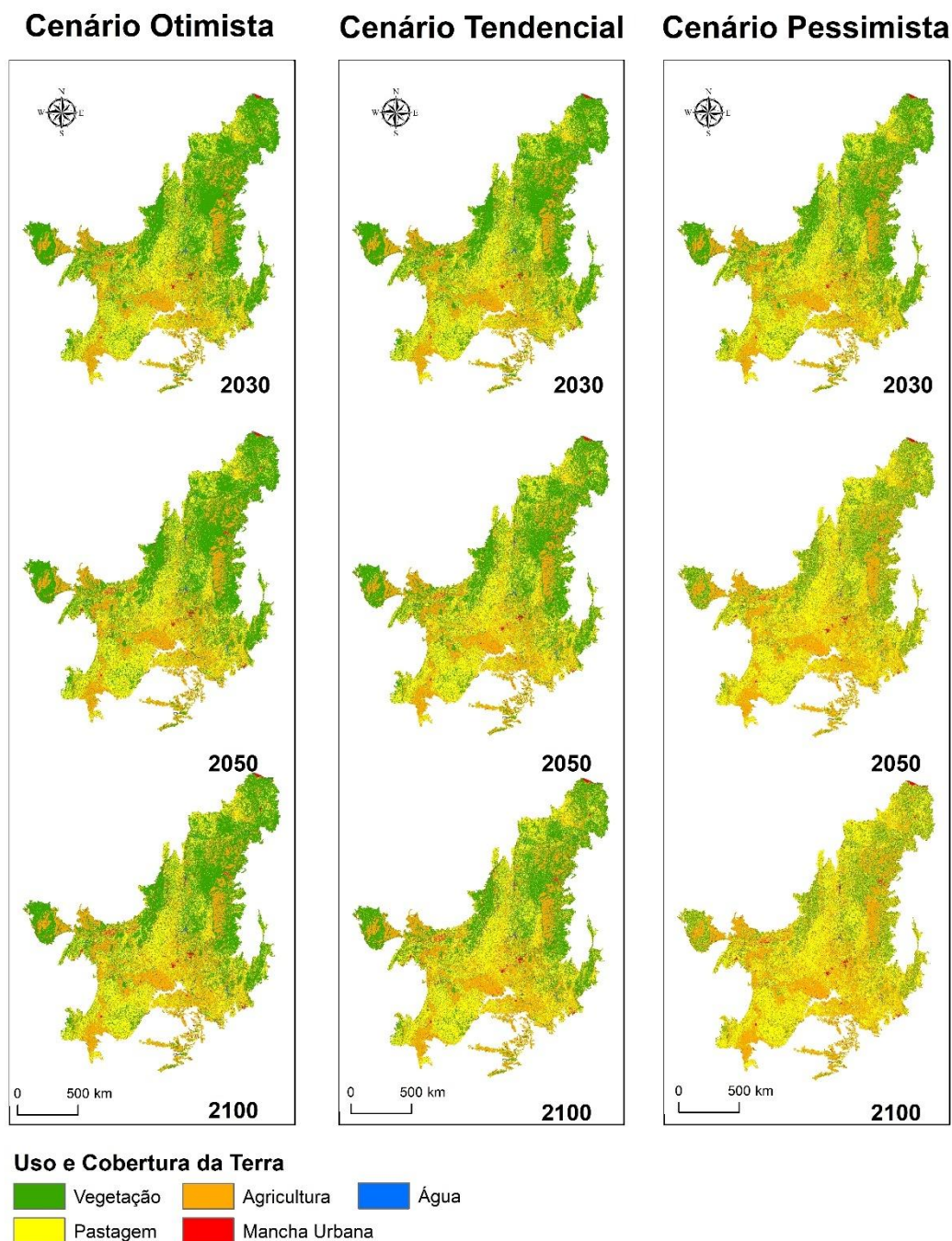
Tabela 2: Áreas (em km²) por classe de uso e cobertura da terra no Cerrado para os cenários Otimista, Tendencial e Pessimista em 2030, 2050 e 2100.

Ano	Cenário	Vegetação	Pastagem	Agricultura	Mancha urbana	Água
2030	Otimista	973.101,84	556.140,41	490.687,18	33.676,98	14.223,66
2030	Tendencial	922.667,65	582.900,58	515.824,34	32.695,80	13.741,70
2030	Pessimista	799.365,72	648.046,40	576.355,25	31.458,47	12.604,24
2050	Otimista	918.966,86	579.165,93	513.025,01	44.023,90	13.273,37
2050	Tendencial	795.818,22	644.893,85	574.003,69	41.823,31	11.916,00
2050	Pessimista	485.149,24	810.701,88	725.881,36	38.350,97	8.371,62
2100	Otimista	855.532,01	605.568,42	538.460,94	57.353,95	12.164,37
2100	Tendencial	721.560,30	676.655,67	604.934,95	55.286,76	10.642,01
2100	Pessimista	398.003,78	849.540,51	763.479,32	51.202,38	6.853,71

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados de modelagem

A comparação entre cenários confirma que a pastagem e a agricultura são o uso antrópico dominantes no Cerrado. No cenário Otimista, a diferença entre ambas é menor; no Tendencial, predomina um equilíbrio; e no Pessimista, a pastagem se amplia de forma expressiva, distanciando-se significativamente da agricultura. A análise espacial indica que as áreas mais suscetíveis à conversão se concentram nas porções centrais e ocidentais do bioma, associadas a solos férteis e à proximidade de eixos logísticos. Esse padrão corrobora estudos que apontam a pecuária extensiva como principal vetor de conversão no Cerrado nas últimas décadas (SANO et al., 2019; STRASSBURG et al., 2017) e reforça a sobreposição entre zonas de alta aptidão agrícola e áreas de maior pressão antrópica (VIEIRA et al., 2021), bem como com estudos que identificam a sobreposição entre zonas de alta aptidão agrícola e áreas de maior pressão antrópica (VIEIRA et al., 2021).

Figura 5 – Distribuição espacial do uso e cobertura da terra no Cerrado para os cenários Otimista, Tendencial e Pessimista, nos anos de 2030, 2050 e 2100.



Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados de modelagem

3.3 Pressões e vulnerabilidades no Cerrado

O Cerrado é o bioma brasileiro com maior déficit de Reserva Legal, concentrando cerca de 42.000 km² de vegetação nativa que necessitam ser recuperados (GUIDOTTI et al.). Além disso, apenas 8,3% de sua extensão está formalmente protegida. Essa condição

de baixa proteção, somada ao déficit ambiental, tem sido agravada pelo destaque do bioma na produção e exportação de grãos e carnes, o que o consolidou como uma das principais fronteiras agrícolas do mundo (FAO).

Esse cenário explica, em parte, as elevadas taxas recentes de desmatamento observadas no bioma. De acordo com o RAD 2024 (MAPBIOMAS, 2025), o Cerrado foi responsável por 60,4% de toda a área desmatada no Brasil em 2023 (11.098,50 km²) e, mesmo após uma redução de 41,2% no ano seguinte, ainda concentrou 52,5% do total nacional (6.521,97 km²), mantendo-se como o bioma mais impactado. Essa pressão está fortemente associada à expansão agropecuária, que responde por mais de 97% da perda de vegetação nativa no país nos últimos seis anos.

Os dados do Monitor do Crédito Rural (MAPBIOMAS, 2024) reforçam esse quadro ao mostrar que estados do Cerrado, como Mato Grosso do Sul e Tocantins, possuem as maiores médias de área financiada por operação com recursos públicos (1,72 km²) e concentram uma parte expressiva das glebas financiadas que apresentam sobreposição com desmatamento. Entre 2019 e 2024, 98.000 km² de glebas financiadas no Brasil apresentaram algum nível de sobreposição com áreas desmatadas, sendo 67% dessas operações destinadas à lavoura e 25% à bovinocultura.

Dessa forma, nosso estudo acrescenta mais evidências de que, sob a estrutura de proteção ambiental existente, o *hotspot* do Cerrado enfrentará rápidas mudanças no uso da terra nos próximos anos, sendo determinantes as medidas ambientais no contexto atual para um futuro menos preocupante em relação as áreas remanescentes.

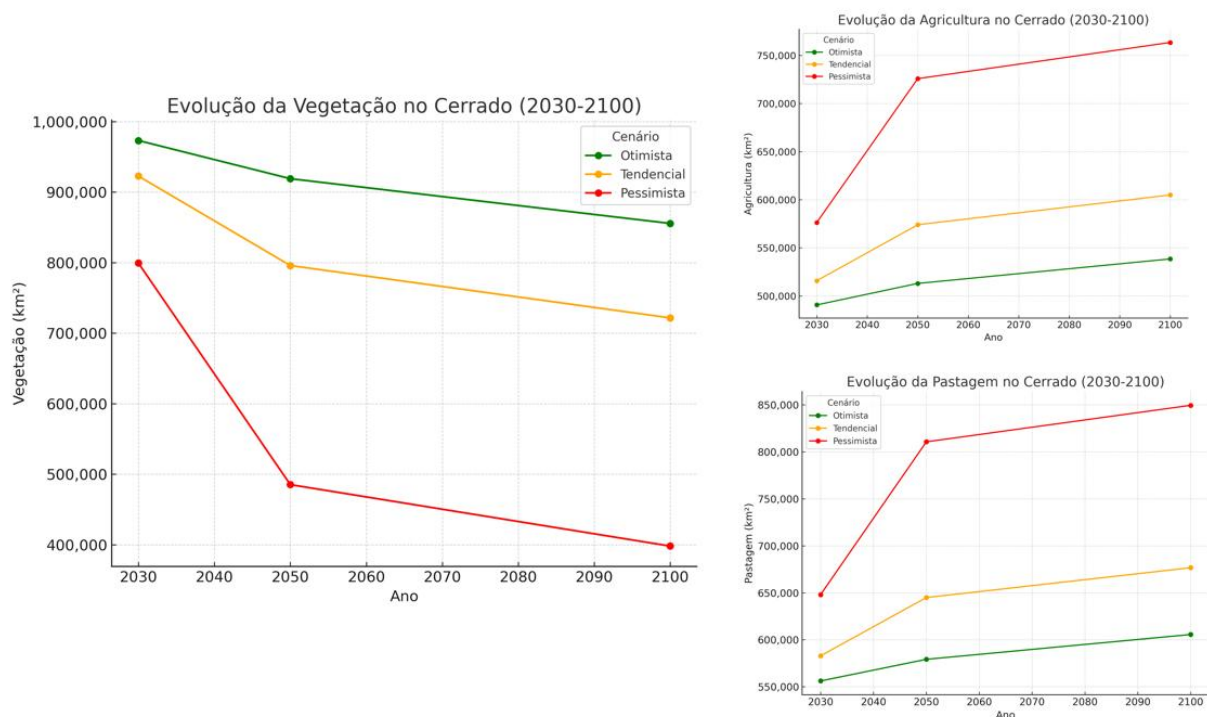
Nossos modelos indicam que a trajetória futura do Cerrado dependerá diretamente das taxas anuais de desmatamento e da efetividade das políticas de controle. No cenário otimista, calibrado com taxas 20% menores que a média recente (6.512,6 km²/ano), observa-se uma desaceleração na perda de vegetação nativa e manutenção de corredores ecológicos mais extensos, favorecendo a conectividade e a resiliência do bioma. No cenário tendencial (8.140,8 km²/ano), os padrões recentes de conversão se mantêm, resultando em perdas expressivas, mas com alguma preservação de áreas estratégicas. Já no cenário pessimista, baseado na média dos anos de pico do PRODES (11.551,0 km²/ano), há forte aceleração da fragmentação e redução crítica das áreas contínuas de vegetação, especialmente nas bordas das frentes de expansão agropecuária.

Entre 2030 e 2050, os modelos projetam taxas médias anuais de desmatamento de -2.707 km²/ano no cenário otimista, -6.342 km²/ano no tendencial e -15.711 km²/ano no pessimista, indicando que as maiores perdas ocorrem nas próximas duas décadas. Esses

valores se aproximam das dinâmicas observadas: nos últimos anos, segundo o PRODES e o RAD MapBiomias, o Cerrado apresentou taxas anuais entre 6.000 e 11.000 km²/ano, com um pico de mais de 11.000 km² em 2023, consolidando-se como o bioma mais desmatado do Brasil. Nesse contexto, o cenário tendencial reproduz de forma realista a média recente, enquanto o pessimista representa uma intensificação ainda maior da pressão agropecuária.

Já o cenário otimista, com cerca de -2.707 km²/ano até 2050, encontra respaldo nos valores históricos analisados por Miziara e Ferreira (2008), que estimavam taxas em torno de 2.000 a 3.000 km²/ano nas décadas de 1990 e início dos anos 2000. Isso sugere que, sob políticas ambientais mais efetivas e controle da expansão desordenada, seria possível retomar patamares semelhantes aos do passado. Após 2050, observa-se uma desaceleração relativa das taxas em todos os cenários — caindo para -1.269 km²/ano (otimista), -1.485 km²/ano (tendencial) e -1.743 km²/ano (pessimista) até 2100. Essa redução, contudo, não reflete menor pressão antrópica, mas sim a diminuição das áreas remanescentes passíveis de conversão, já que a maior parte da vegetação nativa teria sido suprimida até meados do século.

Figura 6. Projeções da evolução da vegetação nativa, pastagens e agricultura no Cerrado entre 2030 e 2100 sob três cenários de desmatamento



Fonte: autores (2025).

A análise das trajetórias futuras mostra que, embora o ritmo de perda varie entre os cenários, todos apontam para um declínio contínuo da vegetação nativa até 2100, acompanhado pela expansão de áreas agropecuárias. No cenário otimista, a retração da vegetação é menos acentuada, mantendo aproximadamente 82% da cobertura original em 2050, enquanto o cenário tendencial cai para 76% e o pessimista para 68%. Esses valores contrastam com os resultados de Ferreira et al. (2013), que projetaram manutenção de cerca de 87% da vegetação nativa em 2050. A diferença pode ser explicada pelo agravamento recente das taxas de desmatamento, que têm oscilado entre 6.000 e 11.000 km²/ano segundo PRODES e RAD MapBiomass, muito acima das médias históricas observadas nas décadas de 1990 e 2000. Dessa forma, nossos modelos reforçam que, sem uma inflexão nas políticas de controle e no financiamento da expansão agropecuária, a perda de áreas remanescentes do Cerrado tende a ser mais acelerada do que o previsto em cenários anteriores.

3.4 Resiliência ecológica e vulnerabilidade climática do Cerrado frente às secas extremas e retrocessos institucionais

Os resultados apresentados para os cenários futuros do Cerrado (2030–2100) evidenciam a convergência entre forçantes climáticas extremas, perda de cobertura vegetal e fragilidades institucionais, configurando um quadro de alta vulnerabilidade ecológica. O bioma, que ocupa papel estratégico na regulação hídrica nacional e na estabilidade climática sul-americana (OLIVEIRA et al., 2019), mostra sinais de aproximação de um limiar de colapso funcional, no qual os mecanismos naturais de resiliência já não são suficientes para garantir o equilíbrio dos processos ecológicos essenciais.

Em escala global, Ohlert et al. (2025) demonstraram que a intensidade e a duração das secas interagem de forma não linear, amplificando de modo expressivo as perdas na produtividade primária terrestre. A análise de 74 ecossistemas de pastagens e savanas mostrou que, embora alguns sistemas se aclimatem parcialmente à seca plurianual, essa capacidade colapsa sob eventos extremos, com perdas acumuladas de produtividade 2,5 vezes superiores após quatro anos consecutivos de seca. Esse padrão é particularmente relevante para o Cerrado, cuja dinâmica depende da reciclagem de umidade e da profundidade radicular da vegetação nativa. A substituição dessa vegetação por culturas anuais e pastagens compactadas altera a estrutura do solo, reduz a infiltração e

compromete a recarga hídrica, tornando o bioma mais suscetível aos efeitos combinados da seca e do uso intensivo da terra (SANO et al., 2019; COLMAN et al., 2024).

De forma complementar, Rosenfield et al. (2025) mapearam a resiliência paisagística ao clima em escala nacional e identificaram o Cerrado como um dos biomas com maior proporção de áreas de baixa resiliência climática, atingindo cerca de 37% do território. Essa vulnerabilidade decorre da alta fragmentação, da homogeneização da paisagem e da perda de conectividade ecológica — fatores que reduzem a diversidade de microclimas e a dispersão de espécies, elementos essenciais para a estabilidade ecológica. Tais processos refletem a substituição progressiva da vegetação nativa por monocultivos e pastagens, concentrados em regiões de solos férteis e infraestrutura consolidada, como também observaram Strassburg et al. (2017) e Vieira et al. (2021). O resultado é um mosaico ambiental com baixa capacidade de reorganização ecológica frente às perturbações climáticas, o que amplia o risco de colapso funcional em escalas regionais.

Paralelamente, o avanço de mudanças normativas e políticas ambientais regressivas tem contribuído para agravar esse quadro. Araújo et al. (2025) evidenciam que a promulgação da Lei nº 22.017/2023 em Goiás representa um dos maiores retrocessos ambientais recentes. A legislação flexibiliza o Código Florestal estadual, permitindo o desmatamento de fragmentos de até 2 hectares, incluindo áreas ecologicamente sensíveis como murundus e capões, além de redefinir como “consolidadas” áreas desmatadas até 2019 — na prática, anistiando mais de uma década de supressões ilegais. Essa flexibilização reduz a proteção das formações vegetais mais frágeis, desestrutura a conectividade ecológica e enfraquece o princípio constitucional da vedação ao retrocesso ambiental, comprometendo compromissos nacionais como o Planaveg e as metas de zero desmatamento até 2030.

A conjunção entre mudanças climáticas, baixa resiliência da paisagem e retrocesso institucional reforça a ideia de que o Cerrado atravessa um processo de erosão sistêmica. Os resultados desta tese, que apontam redução de até 82% da vegetação nativa sob o cenário pessimista, convergem com estudos anteriores que já projetavam declínio acentuado da cobertura natural caso não houvesse inflexão nas políticas de controle (FERREIRA et al., 2013; LAPOLA et al., 2014). Em linha com os achados de Ohlert et al. (2025), as perdas de produtividade associadas a secas severas e prolongadas podem atuar como gatilhos de transições ecológicas irreversíveis, levando o bioma à substituição por paisagens empobrecidas e de baixa capacidade de sequestro de carbono. Essa

tendência pode ser agravada pela persistência do financiamento público de atividades agropecuárias em áreas de alta pressão antrópica, como demonstram os dados recentes do Monitor do Crédito Rural (MAPBIOMAS, 2024).

Para enfrentar esse cenário, é urgente rearticular políticas públicas multiescalares que integrem conservação, restauração e governança territorial. A revogação de legislações permissivas, como a Lei nº 22.017/2023, e o fortalecimento de instrumentos de monitoramento como o PRODES/Cerrado e o MapBiomias RAD, são medidas centrais para conter a degradação. A identificação de áreas de alta resiliência (ROSENFELD et al., 2025) pode orientar esforços de restauração ecológica e conectividade entre fragmentos, promovendo corredores de vegetação capazes de sustentar fluxos biológicos e mitigar o impacto das secas extremas. Tais ações devem ser acompanhadas de incentivos econômicos e fiscais para a recomposição florestal e de políticas de valorização da vegetação nativa como infraestrutura natural de adaptação climática (GIBBS et al., 2015; SOTERRONI et al., 2019).

Em síntese, o Cerrado se encontra em uma zona crítica de transição, na qual a continuidade das tendências atuais poderá comprometer de forma irreversível sua função ecológica, climática e social. Proteger o Cerrado é garantir a estabilidade hídrica e climática do país, a manutenção da biodiversidade e a segurança alimentar das futuras gerações (KLINK; MACHADO, 2005; SILVA et al., 2002). A convergência entre ciência, política e gestão territorial é, portanto, o caminho indispensável para que o bioma continue a sustentar a vida e a produção no século XXI.

Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o futuro do Cerrado dependerá diretamente da interação entre as taxas anuais de desmatamento e a efetividade das políticas públicas de controle ambiental. O cenário otimista, calibrado com taxas 20% inferiores à média recente, projeta a manutenção de corredores ecológicos mais contínuos e uma desaceleração da perda de vegetação nativa, indicando que, sob políticas mais efetivas, seria possível retomar patamares próximos aos observados nas décadas de 1990 e início dos anos 2000. O cenário tendencial, por sua vez, reproduz de forma realista a média recente, mantendo perdas expressivas, mas ainda com alguma preservação de áreas estratégicas. Já o cenário pessimista projeta forte aceleração da fragmentação e da redução das áreas contínuas de vegetação, refletindo o avanço desordenado da fronteira agropecuária.

As projeções até 2050 revelam que as maiores perdas ocorrem nas próximas duas décadas, convergindo com estudos anteriores (Miziara e Ferreira, 2008; Ferreira et al., 2013; Guidotti et al., 2020), que também apontaram o Cerrado como uma das áreas mais vulneráveis do país. Após esse período, observa-se uma desaceleração relativa das taxas de desmatamento em todos os cenários, não em função da diminuição da pressão antrópica, mas da escassez de áreas remanescentes a serem convertidas. Esse padrão reforça o risco de se atingir pontos de não retorno, em que a resiliência ecológica ficará severamente comprometida.

Do ponto de vista metodológico, este trabalho contribui ao integrar um modelo de simulação espacial desenvolvido em Python, fundamentado em cadeias de Markov, pesos de evidência e autômatos celulares, calibrado com dados do PRODES/INPE. Permitindo maior automatização, transparência metodológica e integração de múltiplas variáveis explicativas em simulações de longo prazo.

No âmbito das políticas públicas, nossos resultados reforçam a necessidade de revisão da estrutura de proteção no Cerrado. O déficit de Reserva Legal, estimado em 42.000 km², somado ao baixo percentual de áreas formalmente protegidas (apenas 8,3%), limita a resiliência do bioma. A vinculação de parte do desmatamento a operações de crédito rural público revela incoerências estruturais entre a promoção do agronegócio e a conservação ambiental.

Este trabalho não deve ser interpretado como previsão determinística, mas como exercício prospectivo capaz de iluminar alternativas e riscos. Reconhece-se, contudo, que há limitações, especialmente quanto à capacidade de antecipar variáveis socioeconômicas e políticas com uma escala temporal longa. Ainda assim, as simulações apontam caminhos claros: fortalecimento das políticas de comando e controle; ampliação das áreas protegidas e regularização da Reserva Legal; e alinhamento entre financiamento agrícola e sustentabilidade.

Em síntese, o futuro do Cerrado permanece em aberto. O cenário otimista mostra que ainda é possível conter a perda de vegetação e preservar a resiliência ecológica do bioma. O cenário pessimista, por outro lado, alerta para uma trajetória de fragmentação e esgotamento de capital natural. Cabe à sociedade, ao setor produtivo e ao poder público decidir qual desses caminhos será trilhado.

Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, L. M. de et al. Law 22.017/2023: a dire threat to the Cerrado's survival and Brazil's environmental leadership. *Environmental Development*, v. xx, p. 1–12, 2025.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC). 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- COLMAN, C. C. et al. Dinâmica recente do uso da terra no Cerrado: tendências e implicações para a conservação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 2, p. 455–470, 2024.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Global forest resources assessment 2010: main report. Rome: FAO, 2010.
- FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G.; MIZIARA, F.; SOARES-FILHO, B. S. Modeling landscape dynamics in the central Brazilian savanna biome: future scenarios and perspectives for conservation. *Journal of Land Use Science*, v. 8, p. 403–421, 2013.
- GIBBS, H. K. et al. Brazil's Soy Moratorium. *Science*, v. 347, n. 6220, p. 377–378, 2015.
- GIBBS, H. K. et al. Did Ranchers and Slaughterhouses Respond to Zero-Deforestation Agreements in the Brazilian Amazon? *Conservation Letters*, v. 9, n. 1, p. 32–42, 2016.
- KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservação do Cerrado brasileiro. *Conservation Biology*, v. 19, n. 3, p. 707–713, 2005.
- LAPOLA, D. M. et al. Generalized land use change in the Brazilian land use system. *Nature Climate Change*, v. 4, p. 27–35, 2014.
- MAPBIOMAS. Coleção 9 da série anual de mapas de cobertura e uso do solo do Brasil. São Paulo: MapBiomias, 2024. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- OHLERT, T. et al. Intensity and duration of drought interact to amplify losses in terrestrial primary productivity. *Science*, v. 390, p. 284–289, 2025.
- OLIVEIRA, P. T. S. et al. Nexo água-alimento-energia-serviços ecossistêmicos no Cerrado brasileiro. In: DA SILVA, R. C. V. et al. (org.). *Água e clima: modelagem em grandes bacias*. Porto Alegre: ABRHidro, 2019. p. 7–35.
- ROSENFELD, M. F. et al. Mapping resilient landscapes to climate change in a megadiverse country. *Global Change Biology*, v. xx, p. 1–15, 2025.
- SANO, E. E. et al. Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2000 to 2015. *Land Use Policy*, v. 87, p. 104062, 2019.

SILVA, J. M. C. et al. The Brazilian Cerrado: a biodiversity hotspot. In: MITTERMEIER, R. A. et al. (ed.). Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Washington, DC: CEMEX, 2002. p. 149–154.

SOTERRONI, A. C. et al. Expanding the Soy Moratorium to Brazil's Cerrado. *Science Advances*, v. 5, n. 7, eaat7236, 2019.

STRASSBURG, B. B. N. et al. Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, p. 0099, 2017.

VIEIRA, R. R. S. et al. The loss of native vegetation in Brazilian protected areas. *Biological Conservation*, v. 255, p. 108979, 2021.

ZHANG, R. et al. Study on the spatial spillover effect of land use type change. *Scientific Reports*, v. 13, n. 14456, 2023.

ZHOU, X. et al. Spatial Weights Matrix. In: SHEKHAR, S.; XIONG, H. (eds). *Encyclopedia of GIS*. Boston, MA: Springer, 2008. p. 1127–1131.

Capítulo 4 – Análise da relação entre as mudanças de uso e cobertura da terra entre os Biomas Amazônia e Cerrado (2030 – 2100)

Resumo: A Amazônia e o Cerrado formam o maior contínuo tropical do planeta, abrigando expressiva biodiversidade e desempenhando papel essencial na regulação climática, na produção de água e na sustentação das atividades agropecuárias brasileiras. Entretanto, ambos os biomas vêm sofrendo pressões crescentes de desmatamento e mudanças no uso da terra, impulsionadas pela expansão agrícola e pela fragilidade na aplicação de políticas ambientais. Compreender as dinâmicas espaciais e temporais de conversão nessas regiões é fundamental para antecipar cenários e subsidiar ações de conservação. Neste contexto crítico, este estudo analisou as trajetórias futuras de uso e cobertura da terra na Amazônia e no Cerrado, modelando cenários até 2100 com base em diferentes taxas de desmatamento e contextos de pressão antrópica. Os resultados indicam que o Cerrado tende a se esgotar mais rapidamente nas primeiras décadas, registrando perdas anuais elevadas de vegetação nativa entre 2030 e 2050, enquanto a Amazônia absorve a maior parte da pressão no longo prazo, com aceleração das taxas de desmatamento entre 2050 e 2100. Essa dinâmica revela a forte interdependência entre os biomas, na medida em que a redução de áreas disponíveis no Cerrado impulsiona a expansão sobre a Amazônia. As discussões evidenciam que a expansão agrícola pode ocorrer sem novos desmatamentos, aproveitando áreas já abertas, mas isso depende de políticas de ordenamento territorial e da intensificação sustentável da pecuária. Além disso, a efetividade de políticas públicas, como o Código Florestal, e de compromissos privados, como a Moratória da Soja e os Acordos da Pecuária, é crucial para conter a conversão de vegetação nativa. A integração desses instrumentos e a ampliação de sua aplicação ao Cerrado poderiam evitar emissões expressivas de carbono e contribuir para a conservação da biodiversidade. Conclui-se que o futuro da Amazônia e do Cerrado dependerá não apenas das taxas de desmatamento, mas também da capacidade de implementar estratégias produtivas que desacoplem a expansão agrícola da supressão florestal. A intensificação da pecuária, o uso de áreas já abertas e a adoção efetiva de políticas públicas e privadas são caminhos centrais para alinhar a produção agropecuária com a conservação ambiental.

Palavras-chave: Amazônia; Cerrado; desmatamento; cenários; políticas ambientais; intensificação agropecuária.

1. Introdução

Os biomas Amazônia e Cerrado são fundamentais tanto para a conservação ambiental quanto para a produção agrícola brasileira, abrangendo juntos cerca de 70% do território nacional. Além de concentrarem a maior parte da vegetação nativa remanescente, esses biomas sustentam mais de 53% do rebanho bovino e cerca de 60% da produção de grãos do país, reforçando sua centralidade nas dinâmicas socioeconômicas nacionais (BRASIL, 2024). Apesar dessa relevância compartilhada, ambos estão submetidos a legislações e instrumentos de governança ambiental bastante distintos, o que gera pressões desiguais sobre seus territórios.

A Amazônia, é um dos biomas com maior visibilidade internacional, com isso ele possui maior número de políticas de controle ambiental implementadas a partir de meados dos anos 2000, como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia (2004), a Moratória da Soja (2006) e os Acordos da Pecuária de Desmatamento

Zero (2009), contribuíram para uma expressiva redução nas taxas de desmatamento até 2012 (PRODES, 2023).

Já no Cerrado, embora também exista um plano específico de controle (PPCerrado, lançado em 2010), a legislação é mais permissiva: o Código Florestal autoriza até quatro vezes mais desmatamento em propriedades privadas quando comparado à Amazônia. Além disso, o bioma possui menor proporção de áreas legalmente protegidas e não foi contemplado por mecanismos de mercado de mesma escala, como a moratória da soja (SILVA et al., 2020). Esse conjunto de fatores tem resultado em maior pressão sobre o Cerrado, onde grande parte da conversão ocorre de forma legal.

Os dados mais recentes confirmam esse desequilíbrio. Em 2023, o Cerrado concentrou 61% de todo o desmatamento registrado no Brasil (7.828 km²), enquanto a Amazônia respondeu por 5.152 km², uma queda de 62% em relação ao ano anterior (RAD, 2024; PRODES, 2023). Essa inversão histórica evidencia o deslocamento da fronteira agrícola para o Cerrado, mas também revela a interdependência entre os dois biomas, seja pela continuidade das cadeias produtivas de soja, carne e milho, seja pelos efeitos acumulados sobre ciclos hídricos, climáticos e de biodiversidade em escala continental.

Nesse contexto, estudos de cenários tornam-se ferramentas centrais para avaliar alternativas de uso da terra e projetar seus impactos sobre a conservação e a produção agrícola. O trabalho de Silva et al. (2020), ao analisar quatro cenários de políticas públicas na Amazônia e no Cerrado, evidenciou que a combinação de instrumentos de mercado e de comando e controle pode conciliar produção e conservação, mas também destacou os limites de abordagens isoladas. Ainda assim, faltam análises comparativas que avaliem como esses dois biomas respondem, de forma integrada, a diferentes trajetórias de desmatamento.

Compreender as interdependências entre Amazônia e Cerrado é essencial para avaliar os limites das políticas atuais e propor estratégias conjuntas. É nesse sentido que o presente estudo se insere, ao modelar cenários futuros de uso e cobertura da terra até 2100 em ambos os biomas, comparando taxas de desmatamento, padrões espaciais e implicações para a conservação e a produção agrícola.

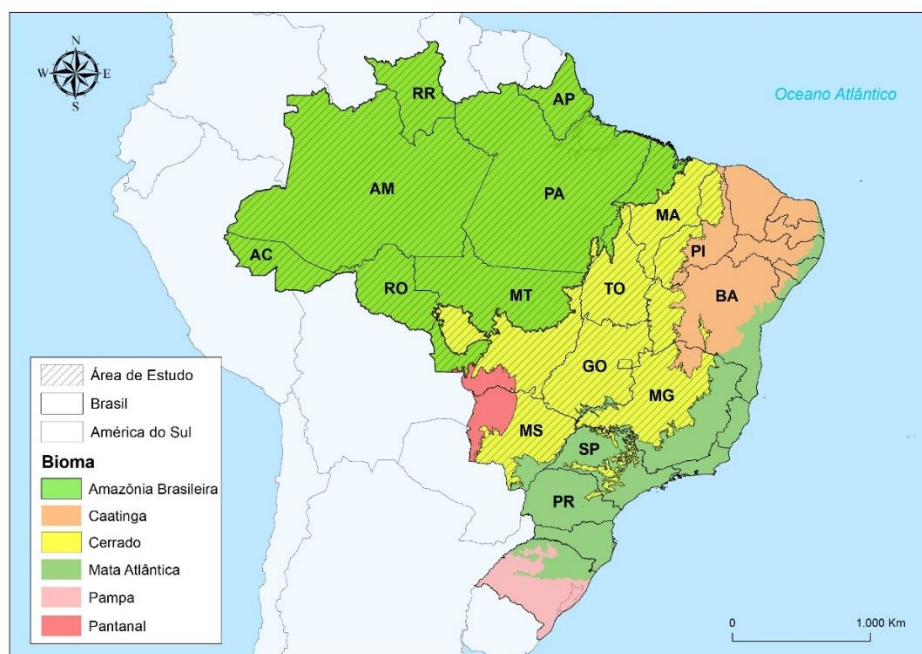
2. Materiais e Métodos

A metodologia empregada neste artigo segue a mesma lógica dos estudos anteriores já desenvolvidos para os biomas Cerrado e Amazônia, adotada e criada por Frazão et. al (2025), com adaptações necessárias para integrar os dois biomas em uma análise comparativa. O procedimento foi organizado em quatro etapas principais.

2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende os biomas Amazônia e Cerrado (figura 1), que juntos ocupam mais da metade do território brasileiro e desempenham papel central na manutenção dos serviços ecossistêmicos. A Amazônia, com cerca de 4,2 milhões de km² em território nacional, é a maior floresta tropical do mundo, reconhecida pela elevada biodiversidade, pelo estoque de carbono e pela regulação climática em escala continental. O Cerrado, segunda maior formação vegetal do país, estende-se por aproximadamente 2 milhões de km², caracterizando-se como uma savana tropical de alta diversidade biológica e com elevada importância para a recarga hídrica. Ambos os biomas vêm sendo intensamente pressionados pela expansão agropecuária e por transformações no uso da terra, o que reforça a necessidade de análises integradas que permitam compreender suas dinâmicas e interdependências.

Figura 1: Mapa de Localização dos biomas Amazônia e Cerrado em relação aos demais biomas brasileiros.



Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados do IBGE (2023).

2.2 Bases de Dados

Foram utilizados os mapas de uso e cobertura da terra do MapBiomias (coleção 9), séries históricas oficiais de desmatamento provenientes do PRODES, além de variáveis explicativas relacionadas ao processo de conversão, como declividade, distância de áreas agrícolas, pastagens, áreas urbanas, rede hidrográfica e distância de estradas.

2.3 Definição dos Cenários

Três cenários distintos foram simulados. No cenário otimista, as taxas de desmatamento foram ajustadas para 20% abaixo da média recente, refletindo maior efetividade das políticas de controle ambiental. O cenário tendencial, também conhecido na literatura (Miziara & Ferreira 2008; Soares-Filho, 2006) como BAU (*Business As Usual*) representou a manutenção dos padrões atuais, com taxas equivalentes às observadas nos últimos anos. Já o cenário pessimista foi baseado na média dos anos de pico de desmatamento, simulando um quadro de intensificação das pressões antrópicas.

2.4 Simulações Espaciais

A modelagem espacial do uso e cobertura da terra foi conduzida por meio da integração de Cadeias de Markov e Pesos de Evidência de Bayes (Weights of Evidence – WoE). Essa combinação metodológica permite tanto a estimativa das quantidades de mudança ao longo do tempo quanto a sua distribuição espacial (Colman et al. 2024).

Primeiramente, as Cadeias de Markov foram utilizadas para calcular as probabilidades de transição entre classes de uso da terra, a partir da comparação de pares de mapas em intervalos de 10 anos (2000 – 2010, 2010 – 2020). As matrizes de transição resultantes forneceram a base para a projeção da quantidade de mudanças em cada cenário.

Em seguida, os Pesos de Evidência de Bayes foram aplicados para espacializar essas probabilidades, associando as transições observadas às variáveis explicativas (declividade, distância a áreas agrícolas, pastagens, áreas urbanas, distância de estradas e rede hidrográfica). Essa abordagem estatística mede a força de associação entre cada variável e o processo de mudança, permitindo refinar a alocação espacial.

Além disso, foi incorporada a análise de vizinhança, por meio de uma janela móvel de 7 x 7 pixels, para considerar os efeitos de contiguidade espacial. O modelo também incluiu o Índice de Pressão de Desmatamento (IPD), responsável por ajustar as

probabilidades em áreas de fronteira agrícola ativa, diferenciando a intensidade dos processos conforme o cenário definido (otimista, tendencial e pessimista).

2.5 Validação

A validação foi realizada a partir da comparação entre as simulações e os dados reais de 2023. Três métricas foram aplicadas: a acurácia (Accuracy), que mede a proporção de coincidência entre observado e simulado; o Erro Absoluto Médio (MAE), que indica a discrepância média entre valores previstos e reais; e o Erro Quadrático Médio (RMSE), que penaliza discrepâncias maiores. Os resultados indicaram desempenho satisfatório, garantindo a consistência estrutural do modelo e a confiabilidade das projeções até 2100. Detalhes adicionais sobre os procedimentos de calibração, métricas utilizadas e discussões complementares podem ser encontrados nos artigos anteriores, que apresentam a aplicação da mesma abordagem metodológica em diferentes contextos.

3. Resultados e Discussões

3.1 Projeções de uso e cobertura da terra (2030–2100)

Os biomas Amazônia e Cerrado ocupam aproximadamente 74% do território brasileiro, configurando-se como as duas maiores formações naturais do país. São biomas limítrofes e, nas últimas décadas, têm se consolidado como as principais fronteiras agrícolas do Brasil, destacando-se especialmente nas regiões do MATOPIBA, da AMACRO e do Arco do Desmatamento.

Ambos desempenham funções estratégicas para o equilíbrio ecológico global: o Cerrado, conhecido como o berço das águas do Brasil, abriga as nascentes das principais bacias hidrográficas nacionais; já a Amazônia constitui o maior estoque contínuo de floresta tropical do planeta, fundamental para o sequestro de carbono e a regulação climática, principalmente na umidade do ar/distribuição de chuvas no país.

Embora a Amazônia concentre maior visibilidade e protagonismo nas políticas públicas ambientais e nas negociações internacionais, o Cerrado encontra-se em situação proporcionalmente mais crítica, apresentando taxas de conversão superiores e menor proteção legal. Essa assimetria decorre, em grande medida, do fato de a Amazônia ser considerada patrimônio global, enquanto o Cerrado permanece menos reconhecido, apesar de sua importância estratégica para a segurança hídrica e manutenção da produção agrícola nacional.

É importante ressaltar que os dois biomas não atuam de forma isolada: a pressão antrópica exercida sobre o Cerrado tende a intensificar o avanço sobre a Amazônia, uma vez que a expansão agropecuária no primeiro reduz as áreas disponíveis e desloca a fronteira agrícola para o segundo. Assim, há uma relação de interdependência em que a degradação de um bioma repercute diretamente sobre a dinâmica do outro.

A aplicação dos modelos de uso e cobertura da terra torna-se fundamental para compreender as trajetórias futuras de Amazônia e Cerrado, permitindo comparar diferentes cenários de desmatamento e avaliar seus impactos de longo prazo. Os resultados obtidos a partir das simulações para os anos de 2030, 2050 e 2100 evidenciam contrastes marcantes entre os cenários otimista, tendencial e pessimista. A tabela 1 e figura 2 sintetizam as projeções de área ocupada por vegetação, pastagem, agricultura, mancha urbana e corpos d'água para os biomas Amazônia e Cerrado, nos anos de 2030, 2050 e 2100, nos cenários otimista, tendencial e pessimista.

Tabela 1: Áreas de Uso e Cobertura da Terra para os biomas Amazônia e Cerrado (em km²).

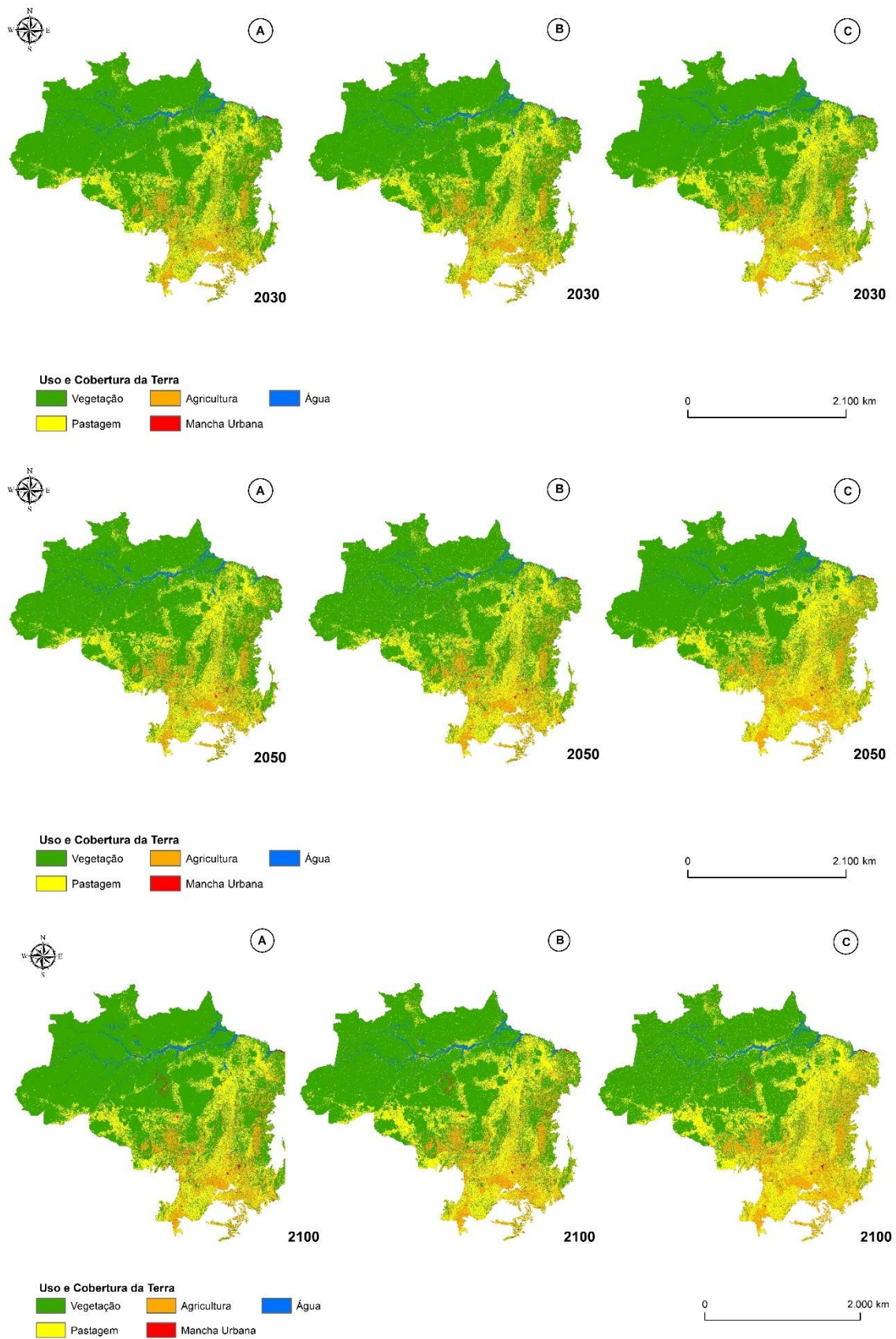
2030						
Classe/Cenário	Amazônia			Cerrado		
	Otimista	Tendencial	Pessimista	Otimista	Tendencial	Pessimista
Vegetação	3.482.133,96	3.467.499,00	3.456.952,80	973.101,84	922.667,65	799.365,72
Pastagem	588.153,36	602.322,94	612.493,86	556.140,41	582.900,58	648.046,40
Agricultura	74.239,91	74.879,96	75.324,70	490.687,18	515.824,34	576.355,25
Mancha urbana	8.428,23	8.358,42	8.326,80	33.676,98	32.695,80	31.458,47
Água	119.343,74	119.238,90	119.201,00	14.223,66	13.741,70	12.604,24

2050						
Classe/Cenário	Amazônia			Cerrado		
	Otimista	Tendencial	Pessimista	Otimista	Tendencial	Pessimista
Vegetação	3.477.041,48	3.375.490,10	3.295.882,97	918.966,86	795.818,22	485.149,24
Pastagem	586.880,78	682.776,27	759.519,64	579.165,93	644.893,85	810.701,88
Agricultura	74.171,63	78.852,11	82.331,94	513.025,01	574.003,69	725.881,36
Mancha urbana	15.070,09	16.779,36	16.712,29	44.023,90	41.823,31	38.350,97
Água	119.135,22	118.401,32	117.852,39	13.273,37	11.916,00	8.371,62

2100						
Classe/Cenário	Amazônia			Cerrado		
	Otimista	Tendencial	Pessimista	Otimista	Tendencial	Pessimista
Vegetação	3.459.231,80	3.043.571,02	2.759.687,32	855.532,01	721.560,30	398.003,78
Pastagem	582.982,07	971.659,91	1.239.800,28	605.568,42	676.655,67	849.540,51
Agricultura	73.946,12	94.096,96	105.332,80	538.460,94	604.934,95	763.479,32
Mancha urbana	37.373,92	47.816,77	54.726,34	57.353,95	55.286,76	51.202,38
Água	118.765,29	115.154,54	112.752,45	12.164,37	10.642,01	6.853,71

Fonte: Dados modelados pelos autores (2025).

Figura 2: Mapas dos modelos preditivos de Uso e Cobertura da Terra para os biomas Amazônia e Cerrado por km². (A) cenário otimista; (B) cenário tendencial; (C) cenário pessimista.

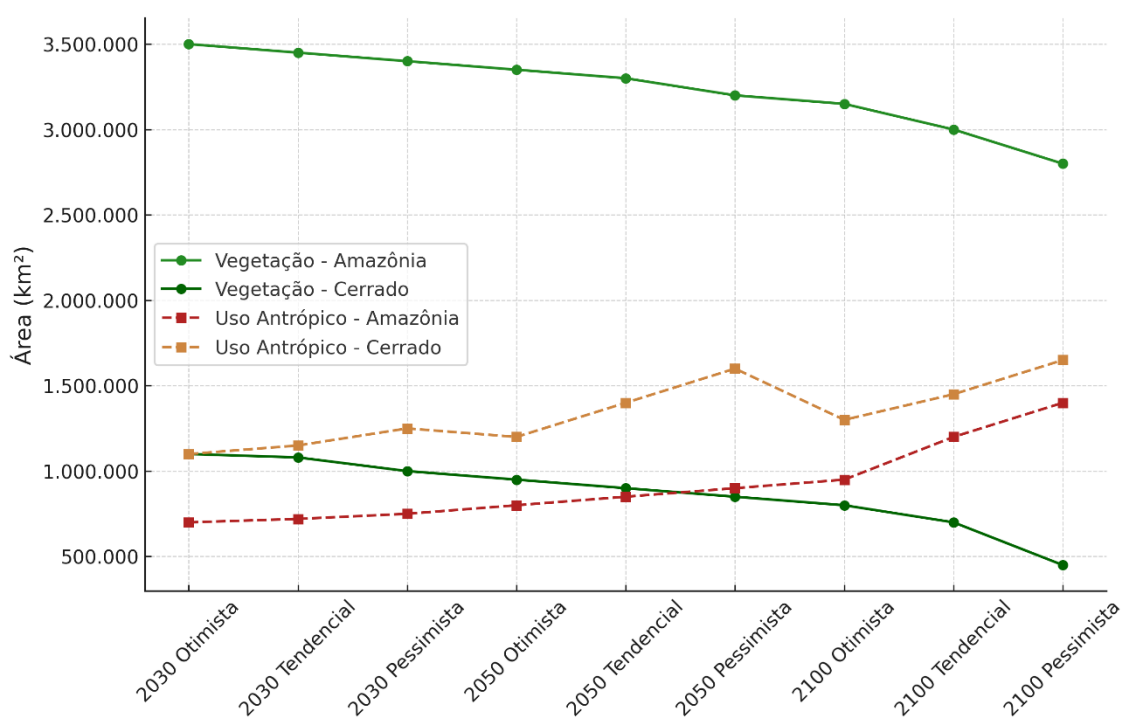


Fonte: Dados modelados pelos autores.

Os resultados da modelagem indicam que o Cerrado apresenta um ritmo de degradação mais acelerado do que a Amazônia, em todos os cenários. Em 2030, a vegetação nativa ainda ocupa 973 mil km² no cenário otimista, mas cai para apenas 398 mil km² em 2100 no cenário pessimista — uma redução superior a 59%. Na Amazônia, a queda proporcional é menor: de 3,48 milhões km² em 2030 para 2,75 milhões km² em 2100 no cenário pessimista, uma redução de cerca de 21%. Essa diferença revela que o Cerrado tende a se esgotar mais rapidamente como fronteira agrícola, deslocando a pressão pela expansão de atividades agropecuárias para a Amazônia.

A conversão antrópica (pastagem, agricultura e urbanização) reforça essa tendência. No Cerrado, o uso antrópico já se aproxima da vegetação em 2050 e se torna dominante até 2100, alcançando mais de 1,6 milhão km² somados no cenário pessimista (figura 3). Na Amazônia, embora a vegetação continue majoritária, também se observa a expansão expressiva da pastagem, que ultrapassa 1,23 milhão km² em 2100 no cenário pessimista. A coincidência temporal entre a saturação do Cerrado e a intensificação do avanço agropecuário na Amazônia indica um efeito de transbordamento, no qual a perda de áreas disponíveis no Cerrado impulsiona novas aberturas na floresta amazônica.

Figura 3. Comparação de vegetação e uso antrópico ao longo dos anos modelados (2030 – 2100)

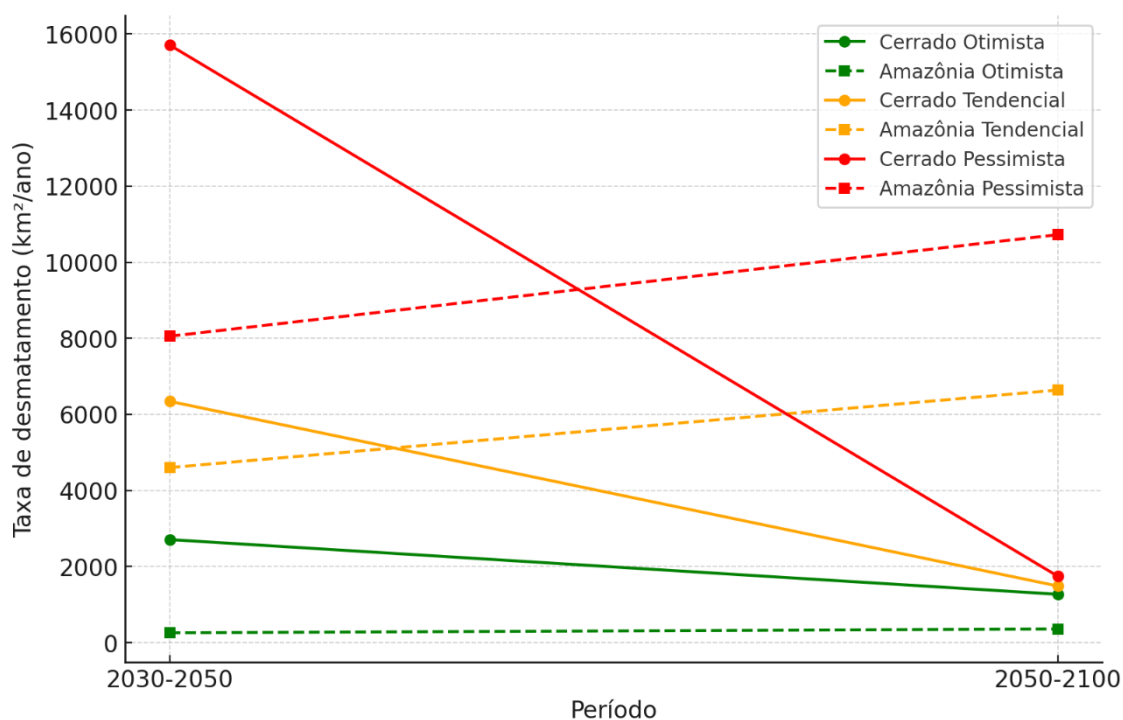


Fonte: Dados modelados pelos autores.

Esses resultados evidenciam que a análise isolada de cada bioma é insuficiente. O esgotamento rápido do Cerrado não apenas compromete sua biodiversidade e função hídrica, mas também alimenta a pressão sobre a Amazônia, especialmente em regiões de transição, como no Arco do Desmatamento e na AMACRO. A trajetória projetada sugere que, sem políticas integradas de conservação, a dinâmica de ocupação tende a reproduzir um efeito dominó, no qual a conversão acelerada no Cerrado antecipa e intensifica o desmatamento amazônico, dificultando o cumprimento da meta de desmatamento zero até 2030, assumida pelo Brasil.

Os achados da modelagem dialogam diretamente com os compromissos assumidos pelo Brasil na COP 28 (Dubai, 2023), quando o país reiterou a meta de alcançar o desmatamento líquido zero (ilegal e legal) até 2030. Embora essa promessa tenha se consolidado como pilar da política climática nacional, os cenários mostram que a sua viabilidade depende de uma abordagem que considere Amazônia e Cerrado de forma integrada. A trajetória mais crítica observada no Cerrado, com perdas aceleradas de vegetação nativa e expansão antrópica superior a 1,6 milhão km² até 2100, demonstra que a pressão exercida sobre este bioma inevitavelmente repercute na Amazônia. Assim, a realização da meta internacional exige políticas que não apenas contenham o desmatamento florestal (na Amazônia), mas também reconheçam a área de savana tropical como fronteira determinante para o sucesso do Brasil nas negociações climáticas globais.

Outro dado que reforça essa análise é a taxa de desmatamento anual nos modelos simulados, que indicam que o Cerrado perde vegetação em um ritmo mais acelerado que a Amazônia no curto prazo, conforme observado na figura 4.

Figura 4. Taxa média anual de desmatamento (km²/ano) – Cerrado x Amazônia.

Fonte: Dados modelados pelos autores.

Entre 2030 e 2050, mesmo no cenário otimista, o Cerrado já apresenta reduções próximas a 2,7 mil km² por ano, enquanto a Amazônia mantém relativa estabilidade, com perdas ligeiramente superiores a 250 km² anuais. Quando se avança para o cenário tendencial, a diferença entre os biomas torna-se mais evidente: o Cerrado perde cerca de 6,3 mil km² por ano, contra 4,6 mil km² na Amazônia. No cenário pessimista, o contraste é ainda mais marcante, com o Cerrado atingindo aproximadamente 15,7 mil km² por ano, quase o dobro da taxa observada na Amazônia, que apresenta perdas em torno de 8 mil km² anuais.

A redução expressiva das taxas médias de desmatamento no cenário pessimista, observada entre 2050 e 2100, não representa um comportamento mais favorável à conservação, mas reflete o esgotamento progressivo das áreas naturais disponíveis para conversão. À medida que o modelo avança no tempo, a quantidade de vegetação remanescente diminui, limitando a expansão das transições antrópicas mesmo sob pressões elevadas. Esse comportamento é característico de modelos baseados em Cadeias de Markov e Autômatos Celulares, nos quais a taxa de transição depende diretamente da disponibilidade espacial das classes envolvidas. Assim, a tendência de queda nas taxas absolutas de desmatamento em cenários pessimistas está associada à saturação do sistema e à perda quase total das áreas suscetíveis à conversão.

No período seguinte, entre 2050 e 2100, a dinâmica se inverte. O Cerrado, já amplamente reduzido, passa a apresentar menores taxas de supressão, variando de pouco mais de 1,2 a 1,7 mil km² por ano nos cenários tendencial e pessimista. A Amazônia, ao contrário, intensifica as perdas: no cenário otimista, o desmatamento sobe para 356 km² anuais, enquanto nos cenários tendencial e pessimista alcança, respectivamente, 6,6 mil e 10,7 mil km² por ano. Ou seja, enquanto o Cerrado se esgota mais rapidamente no início do período, a Amazônia passa a concentrar a maior parte da pressão no longo prazo, revelando a forte interdependência entre os dois biomas e o deslocamento espacial da fronteira de desmatamento.

A interpretação desses resultados se fortalece quando comparada a análises recentes sobre o papel das políticas de controle do desmatamento. Como destacam Brandão et al. (2020), os instrumentos existentes: Código Florestal (CF), a Moratória da Soja e o Compromisso da Pecuária, têm atuado de forma complementar na Amazônia, mas permanecem pouco efetivos no Cerrado. Enquanto o CF restringe de maneira mais rigorosa a abertura de áreas na Amazônia, no Cerrado se permite até quatro vezes mais supressão dentro de uma mesma propriedade, tornando o bioma particularmente vulnerável. Nossos resultados dialogam diretamente com essa constatação: a rápida redução da vegetação no Cerrado até 2050 reflete justamente essa fragilidade normativa, antecipando a saturação de áreas disponíveis e deslocando a fronteira de expansão para a Amazônia. Os mesmos autores estimam que, caso Moratória da Soja e Compromisso da Pecuária fossem expandidos ao Cerrado, poderiam ser evitadas emissões da ordem de 7 Pg CO_{2e}, o que se alinha à necessidade revelada pelos cenários simulados de conter a sobrecarga futura da Amazônia. Além disso, medidas previstas no código florestal, como a recomposição de áreas degradadas e a ampliação das Cotas de Reserva Ambiental, poderiam recuperar aproximadamente 0,40 Pg CO_{2e}, reforçando o potencial de integração entre instrumentos de conservação e as dinâmicas territoriais de longo prazo. Nesse sentido, os resultados da modelagem aqui apresentados demonstram que o sucesso do Brasil no cumprimento de suas metas internacionais depende de uma política ambiental que vá além da proteção amazônica e que incorpore o Cerrado como elemento central para a estabilidade do sistema socioecológico nacional.

Outro ponto de convergência entre os resultados aqui apresentados e as estatísticas oficiais diz respeito às projeções de expansão agrícola e à intensificação da pecuária. Segundo o MAPA (2018), entre 9 e 24 milhões de hectares adicionais poderão ser necessários até 2028 para atender à demanda por grãos, área que, em tese, poderia ser

acomodada dentro das áreas já abertas tanto no Cerrado quanto na Amazônia. No entanto, a pressão tende a ser ainda maior sobre a pecuária: dados do IBGE (2019) indicam que o rebanho bovino na região já supera 86 milhões de cabeças, ocupando grande parte das áreas convertidas, enquanto Arantes et al. (2018) mostram que, sem uma intensificação substancial, o espaço disponível será insuficiente para sustentar a produção futura. Essa perspectiva reforça os achados da modelagem: o Cerrado, ao perder mais da metade de sua vegetação nativa até 2100 em cenários pessimistas, tende a se esgotar como fronteira pecuária, transferindo a pressão para a Amazônia, onde o avanço sobre áreas de floresta se tornará cada vez maior. Assim, a dinâmica projetada não é apenas hipotética, mas encontra respaldo nas estatísticas de demanda agrícola e na estagnação da produtividade da pecuária, evidenciando a necessidade de políticas de intensificação e uso mais eficiente das áreas já desmatadas.

3.3 Interdependências, políticas e implicações para a conservação

As projeções obtidas para os biomas Amazônia e Cerrado indicam dinâmicas distintas, mas fortemente conectadas. No cenário tendencial, o Cerrado se mantém como a principal fronteira agrícola até meados de 2050, enquanto a Amazônia passa a concentrar novas frentes de expansão a partir da saturação das áreas agricultáveis do primeiro bioma. Esse padrão confirma a hipótese do efeito dominó dos biomas descrita por Soares-Filho et al. (2006, 2014), segundo a qual a limitação de terras disponíveis em um sistema territorial estimula o deslocamento das pressões antrópicas para regiões adjacentes com maior cobertura natural.

Esses resultados convergem com as análises de Strassburg et al. (2017) e Arantes et al. (2018), que destacam a formação de um corredor agropecuário contínuo entre o norte do Cerrado e o sul da Amazônia, especialmente nas regiões do MATOPIBA e da AMACRO. Essa transição espacial reflete uma reconfiguração das fronteiras produtivas, sustentada pela expansão logística, pela oferta de crédito rural e por políticas voltadas à exportação de grãos e carne. Mesmo diante de iniciativas de controle como a Moratória da Soja e os Acordos da Pecuária (Gibbs et al., 2015; Gibbs et al., 2016), as simulações apontam que a conversão da vegetação tende a se deslocar para áreas onde a fiscalização e o monitoramento permanecem frágeis, reproduzindo um padrão de compensação territorial.

A perda projetada de vegetação no Cerrado também dialoga com as análises de Miziara e Ferreira (2008) e Colman et al. (2024), que associam o avanço agropecuário à

disponibilidade de recursos hídricos e à expansão de perímetros irrigados. Regiões como o oeste da Bahia, norte de Goiás e sul do Tocantins exemplificam esse processo, no qual a infraestrutura hídrica e a alta aptidão agrícola intensificam o ciclo de conversão da terra. A coerência entre as simulações e os dados recentes do RAD MapBiomias (2024), que identificam mais de 60% do desmatamento nacional concentrado no Cerrado, reforça a consistência espacial dos resultados apresentados.

Na Amazônia, os cenários mais pessimistas sugerem a superação do limiar de 20 a 25% de perda de cobertura florestal — patamar considerado crítico por Lovejoy e Nobre (2018) para a manutenção da reciclagem de umidade e da estabilidade climática. A conversão simulada nas bordas sul e leste da floresta indica o risco de savanização progressiva, com efeitos diretos sobre o regime de chuvas e a recarga hídrica do Cerrado. Essa relação evidencia o grau de interdependência entre os biomas: o colapso de um sistema de evapotranspiração pode comprometer a resiliência hídrica e ecológica do outro (Ferreira et al., 2013; Lapola et al., 2014).

Os resultados também apontam para a permanência de políticas ambientais fragmentadas, incapazes de lidar com as interações territoriais entre os biomas. Conforme argumentam Fearnside (2020) e Moutinho et al. (2022), o bloqueio do desmatamento em uma região, sem planejamento integrado, tende apenas a deslocar a degradação para áreas adjacentes. A flexibilização normativa recente em estados como Goiás (Araújo et al., 2025) e o avanço de propostas de revisão do Código Florestal (Fernandes et al., 2025) exemplificam esse descompasso entre os compromissos climáticos assumidos internacionalmente e a prática da gestão ambiental em nível estadual.

Nesse sentido, os resultados desta pesquisa não apenas corroboram estudos anteriores sobre as dinâmicas de uso da terra (Soares-Filho et al., 2006; Strassburg et al., 2017; Vieira et al., 2021), mas também reforçam a necessidade de políticas integradas entre Amazônia e Cerrado, capazes de alinhar instrumentos econômicos, ambientais e territoriais sob uma estratégia nacional de ordenamento sustentável. A consolidação de políticas interbioma pode reduzir o deslocamento das fronteiras agrícolas, preservar a conectividade ecológica e impedir que o avanço do desmatamento em um bioma atue como gatilho para a degradação do outro.

4. Conclusão

Os cenários projetados indicam que o Cerrado se esgota mais rapidamente, perdendo até 59% de sua vegetação até 2100 no cenário pessimista, enquanto a Amazônia absorve a pressão no longo prazo, com taxas anuais de desmatamento que chegam a superar 10 mil km². Essa interdependência evidencia que políticas focadas apenas na Amazônia são insuficientes: o avanço no Cerrado desloca a fronteira agrícola e intensifica a degradação amazônica.

A expansão agropecuária prevista pelo MAPA e os limites da pecuária extensiva já apontam para esse esgotamento. Ao mesmo tempo, instrumentos como o Código Florestal e Moratória da soja podem reduzir emissões e conservar estoques de carbono, desde que sejam fortalecidos e aplicados também ao Cerrado.

Assim, alcançar o desmatamento zero até 2030 exige uma estratégia integrada entre Amazônia e Cerrado, que una conservação, intensificação produtiva e governança ambiental. Sem isso, o risco é apenas transferir a pressão de um bioma para outro, comprometendo tanto a biodiversidade quanto as metas climáticas globais.

A concretização dessa meta também está diretamente vinculada aos compromissos brasileiros de mitigação de emissões de gases de efeito estufa. O país assumiu, no Acordo de Paris e reafirmou na COP-28, a redução de 43% das emissões de CO₂ equivalente até 2030, em relação aos níveis de 2005, e a neutralidade de carbono até 2050. Considerando que mais da metade das emissões nacionais deriva da conversão de vegetação nativa, a contenção do desmatamento na Amazônia e no Cerrado é determinante para o cumprimento dessas metas. Garantir a conservação e a restauração de ecossistemas nesses biomas significa não apenas reduzir as emissões líquidas, mas também consolidar a imagem do Brasil como ator central na agenda climática global, reafirmando que o equilíbrio entre produção e conservação é condição essencial para a sustentabilidade de longo prazo.

Referências Bibliográficas

ARANTES, A. E.; COUTO, V. R.; SANO, E. E.; FERREIRA, L. G. Livestock intensification potential in Brazil based on agricultural census and satellite data analysis. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 53, p. 1053–1060, 2018. DOI: 10.1590/S0100-204X2018000900009.

BRANDÃO, A. et al. Policy and market scenarios for zero deforestation in the Amazon and Cerrado biomes. *Global Environmental Change*, v. 75, p. 102585, 2022. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2022.102585.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). *Projeções do Agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28 – Projeções de Longo Prazo*. Brasília: MAPA, 2018.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Pesquisa da Pecuária Municipal – PPM*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=serieshistoricas>. Acesso em: 10 mar. 2019.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Mapas de Biomas e de Vegetação*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

COLMAN, C. C. et al. Dinâmica recente do uso da terra no Cerrado: tendências e implicações para a conservação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 2, p. 455–470, 2024.

GIBBS, H. K. et al. Brazil's Soy Moratorium. *Science*, v. 347, n. 6220, p. 377–378, 2015. DOI: 10.1126/science.aaa0181.

GIBBS, H. K. et al. Did ranchers and slaughterhouses respond to zero-deforestation agreements in the Brazilian Amazon? *Conservation Letters*, v. 9, n. 1, p. 32–42, 2016. DOI: 10.1111/conl.12175.

MIZIARA, F.; FERREIRA, N. C. Expansion of agriculture in the Brazilian Cerrado: the case of soybeans in Goiás State. *Environment, Development and Sustainability*, v. 10, p. 745–762, 2008. DOI: 10.1007/s10668-008-9155-x.

PRODES – Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. *Dados de desmatamento 2004–2023*. São José dos Campos: INPE, 2023.

RAD – Relatório Anual de Desmatamento no Brasil. Série 2024. São Paulo: MapBiomas, 2024. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/>

SOARES-FILHO, B. S. et al. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, v. 440, p. 520–523, 2006. DOI: 10.1038/nature04389.

SOARES-FILHO, B. S. et al. Cracking Brazil's Forest Code. *Science*, v. 344, n. 6182, p. 363–364, 2014. DOI: 10.1126/science.1246663.

Considerações Finais da Tese

A tese buscou compreender a dinâmica futura do uso e cobertura da terra nos biomas Amazônia e Cerrado até o ano de 2100, a partir da elaboração de cenários alternativos de governança ambiental. A investigação foi orientada por duas questões principais: a primeira buscou identificar quais seriam os cenários futuros do agronegócio na Amazônia e no Cerrado, entre 2050 e 2100, considerando diferentes contextos ambientais e legais; a segunda indagou de que forma a redução de áreas disponíveis para conversão no Cerrado influencia o aumento da pressão do agronegócio na Amazônia.

Em relação à primeira questão, os resultados revelaram que os caminhos futuros da Amazônia e do Cerrado são fortemente dependentes da governança ambiental e da aplicação das políticas públicas. No caso da Amazônia, as simulações do Artigo 1 indicaram que, no cenário otimista, a floresta pode preservar mais de 3,4 milhões de km² de vegetação nativa até 2100, enquanto no cenário pessimista esse valor cai para cerca de 2,76 milhões de km². Nesse último, observa-se ainda a expansão significativa das pastagens, ultrapassando 1,23 milhão de km², além do avanço da agricultura e das áreas urbanas. Já no Cerrado, análise centrada no Artigo 2, este se encontra em cenário ainda mais vulnerável: mesmo no cenário otimista, há perdas expressivas de vegetação até 2100. Nos cenários tendencial e pessimista, o bioma pode ultrapassar 1,2 milhão de km² convertidos, comprometendo não apenas unidades de conservação, mas também áreas estratégicas de recarga hídrica e corredores ecológicos. Esses achados confirmam que, em ambos os biomas, a legislação e sua aplicação efetivam /são elementos decisivos na contenção da degradação e na definição das trajetórias de uso da terra.

Quanto à segunda questão de pesquisa, o Artigo 3 demonstrou que a relação entre os biomas não pode ser entendida de forma isolada, mas como uma dinâmica interdependente. A redução progressiva das áreas convertíveis no Cerrado, marcada por sua intensa expansão agrícola e por uma legislação menos restritiva, amplia a pressão sobre a Amazônia, que tende a se consolidar como a principal fronteira de expansão agropecuária no longo prazo. Esse resultado confirma que a pressão exercida sobre o Cerrado não apenas compromete a conservação de sua vegetação nativa, mas também desencadeia efeitos diretos na floresta amazônica, intensificando o desmatamento em uma região já vulnerável a pontos de irreversibilidade ecológica.

De modo geral, os resultados integrados reforçam que a trajetória futura da Amazônia e do Cerrado dependerá da governança ambiental em múltiplas escalas. Os

cenários otimistas evidenciam a possibilidade de conciliar produção agropecuária e conservação, desde que haja cumprimento efetivo do Código Florestal, combate ao desmatamento ilegal e incentivos à recuperação de áreas degradadas. Já os cenários pessimistas deixam claro que o enfraquecimento da legislação e da fiscalização pode resultar em perdas irreversíveis de biodiversidade, de serviços ecossistêmicos e de estabilidade climática, tanto em nível nacional quanto global.

Além dos resultados substantivos, esta tese também oferece contribuições metodológicas e científicas. O desenvolvimento de um script em Python, inspirado nas plataformas Dinamica EGO e TerrSet, permitiu maior flexibilidade, reprodutibilidade e personalização dos modelos, representando um avanço no campo das simulações de uso da terra. Cientificamente, a principal inovação está na integração dos biomas Amazônia e Cerrado em projeções de longo prazo, evidenciando que políticas setoriais e isoladas não são suficientes para garantir a conservação. Ao contrário, torna-se imprescindível adotar estratégias articuladas que considerem a interdependência entre os biomas.

Embora a pesquisa tenha buscado avançar nas simulações de uso e cobertura da terra, é importante reconhecer que os modelos não constituem uma matemática exata. Trata-se de construções baseadas em premissas e cenários, que permitem explorar futuros possíveis, o que é bastante útil ao planejamento e adoção de estratégias. As incertezas associadas às políticas públicas, à dinâmica econômica e às mudanças climáticas tornam inevitável certo grau de indeterminação nos resultados, o que já era esperado. Nesse sentido, as projeções aqui apresentadas devem ser compreendidas como instrumentos de reflexão e apoio à tomada de decisão, e não como descrições definitivas.

Por fim, cabe retomar a hipótese que norteou este trabalho: a de que a diminuição das áreas convertíveis no Cerrado aumentaria a pressão sobre a Amazônia, intensificando o desmatamento neste bioma e gerando cenários preocupantes de expansão de cultivos e pastagens. Os resultados permitem confirmar essa hipótese. As simulações mostraram que a saturação do Cerrado, marcada pela redução drástica das áreas disponíveis para conversão, desloca a fronteira de expansão agropecuária para a Amazônia, potencializando os riscos ambientais e climáticos já identificados para a região, conforme visto no capítulo 4. Essa constatação reforça que o destino da Amazônia não pode ser compreendido de forma isolada, mas em relação dependente à trajetória de conservação do Cerrado. Assim, a tese confirma que, apenas políticas públicas articuladas e integradas entre os dois biomas poderão assegurar a conservação da vegetação nativa, a manutenção da biodiversidade e a estabilidade climática em escala nacional e global.