



ANÁLISE DAS ÁREAS DE EMISSÃO E REMOÇÃO DE CARBONO NA RESERVA BIOLÓGICA DO GURUPI, MARANHÃO, BRASIL

Juciana da Conceição Birino de Souza¹

Izadora Santos de Carvalho²

Marcos Vinicius Lima de Sousa³

Silas Nogueira de Melo⁴

Swanni T. Alvarado⁵

RESUMO

Na Amazônia Maranhense, as emissões de carbono são impulsionadas principalmente pelo desmatamento e pelas queimadas, processos diretamente associados à ocupação desordenada do território e à exploração intensiva dos recursos naturais. A Reserva Biológica do Gurupi (REBIO), último remanescente significativo da floresta amazônica no estado do Maranhão, sofre pressões antrópicas constantes, como a exploração madeireira, o avanço da pecuária e a expansão agrícola, que têm gerado conflitos fundiários e ameaçado a permanência de grupos sociais tradicionais. Esta pesquisa teve como objetivo analisar a dinâmica das emissões e remoções de carbono na REBIO entre 1985 e 2020, verificando as transformações de uso e cobertura da terra, a incidência de queimadas, suas relações por meio do Diagrama Sankey e as áreas de emissões e remoções. A metodologia envolveu análises quantitativas e qualitativas de dados históricos do Projeto MapBiomas, confecção de tabelas, gráficos pelo QGis, ArcGis, RStudio e Google Colabory, identificando padrões de transformação da paisagem e compreendendo a influência das pressões antrópicas sobre a unidade de conservação. Os resultados indicaram uma redução progressiva da Formação Florestal, que passou de 92,48% em 1985 para 76,2% em 2020, com queda mais acentuada entre 2000 e 2005. Entre 2010 e 2015, o desmatamento e as queimadas responderam por 44% das emissões de carbono, enquanto o período de 2015 a 2020 apresentou aumento da regeneração florestal, responsável por 79% das remoções. O estudo contribui para o entendimento das dinâmicas ambientais na REBIO do Gurupi e pode subsidiar políticas públicas de conservação e mitigação das mudanças climáticas em áreas críticas da Amazônia.

Palavras-chave: Desmatamento, Fogo, Carbono.

ABSTRACT

In the Maranhense Amazon, carbon emissions are mainly driven by deforestation and fires, processes directly associated with disordered land occupation and the intensive exploitation of natural resources. The Gurupi Biological Reserve (REBIO), the last significant remnant of the Amazon rainforest in the state of Maranhão, faces constant anthropogenic pressures, such as logging, cattle ranching expansion, and agricultural advancement, which have generated land tenure conflicts and threatened the permanence of traditional social groups. This research aimed to analyze the dynamics of carbon emissions and removals in the REBIO between 1985 and 2020, considering the transformations in land

¹Doutoranda em Geografia da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, jucianasouza16@gmail.com;

²Doutora em Ciências Agrárias pela Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, izadoraflorestal@gmail.com;

³Doutorando em Geografia da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, ahmarcos.vinicius@gmail.com;

⁴Professor Adjunto do Departamento de Geografia da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, silasmelo@professor.uema.br;

⁵Prof. Dra. da Facultad de Ciencias da Universidad Nacional de Colombia - UNAL, stalvarador@unal.edu.co.



use and land cover, the incidence of fires, and their relationships through a Sankey Diagram. The methodology involved quantitative and qualitative analyses of historical data from the MapBiomass Project, as well as the production of tables and graphs using QGIS, ArcGIS, RStudio, and Google Colaboratory, allowing the identification of landscape transformation patterns and a better understanding of anthropogenic pressures on the conservation unit. The results indicated a progressive reduction in Forest Formation, which decreased from 92.48% in 1985 to 76.2% in 2020, with the most significant decline occurring between 2000 and 2005. Between 2010 and 2015, deforestation and fires accounted for 44% of carbon emissions, while the 2015–2020 period showed an increase in forest regeneration, responsible for 79% of carbon removals. This study contributes to a deeper understanding of environmental dynamics in the Gurupi Biological Reserve and may support public policies for conservation and climate change mitigation in critical areas of the Amazon.

Keywords: Deforestation, Fire, Carbon.

INTRODUÇÃO

Na Amazônia Maranhense, a emissão de carbono é impulsionada, sobretudo, pelo desmatamento e pelas queimadas, diretamente ligados às ocupações desordenadas do território e à exploração intensa dos recursos naturais (Santos *et al.*, 2017; Alves; Alvarado, 2019). Esses processos acarretam sérios impactos ambientais, como a perda da biodiversidade, a degradação do solo e o assoreamento de cursos d'água, além de afetarem negativamente a saúde humana e a economia regional. Estima-se que 76% da cobertura florestal do Maranhão tenha sido desmatada, restando apenas 24% em áreas ainda conservadas, concentradas principalmente em Unidades de Conservação (UC) (Silva-Junior *et al.*, 2020).

A substituição de florestas por pastagens e áreas agrícolas constitui a principal fonte de emissão de carbono, uma vez que as florestas desempenham papel essencial como sumidouros naturais, armazenando grandes quantidades de carbono em sua biomassa e no solo (Gouvello; Britaldo; Nassar, 2010). A queima dessas áreas libera elevadas concentrações de gases de efeito estufa, intensificando o aquecimento global e reduzindo a capacidade de sequestro de carbono pela vegetação (Santos *et al.*, 2017). Adicionalmente, eventos climáticos extremos, como as secas de 1997, 1998 e 2005, associadas ao fenômeno *El Niño*, intensificaram a mortalidade da vegetação e comprometeram a resiliência das florestas tropicais na Amazônia (Rosan, 2017).

Nesse contexto, áreas protegidas, como a Reserva Biológica do Gurupi (REBIO), localizada no Centro de Endemismo Belém - a porção mais desmatada da Amazônia brasileira - são estratégicas para a conservação ambiental (Pereira; Vieira, 2019). Foi criada pelo Decreto de nº 95.614 de 12 de janeiro de 1988 e é assegurada pela Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000 que instaurou o Sistema Nacional de Unidades de conservação da Natureza – SNUC, a qual afirma que a Reserva Biológica tem como objetivo a preservação integral da biota e os demais



atributos naturais existentes em seus limites, sem nenhuma interferência humana direta ou com modificações ambientais (Brasil, 2003).

A unidade tem sofrido constantes pressões antrópicas ligadas à exploração madeireira, avanço da pecuária e expansão agrícola, o que tem gerado conflitos fundiários e ameaça a permanência de grupos sociais tradicionais (Mesquita *et al.*, 2019). Assim, esta pesquisa⁶ objetiva analisar a dinâmica das emissões e remoções de carbono na REBIO do Gurupi entre 1985 e 2020, a partir da avaliação das transformações nas classes de uso e cobertura da terra, bem como da incidência de queimadas e suas correlações com as mudanças no uso e na cobertura. Essa análise foi conduzida com o apoio do Diagrama de Sankey, que permitiu visualizar de forma integrada os fluxos e transições entre as diferentes classes ao longo do período estudado (Souza, 2024) e compreender as dinâmicas das áreas emitidas e removidas.

A metodologia envolveu análises quantitativas e qualitativas de dados históricos do Projeto MapBiomass, confecção de tabelas, gráficos pelo QGIS, ArcGIS, RStudio e Google Colabory. Esses dados permitiram identificar padrões de transformação da paisagem e avaliar a dinâmica das pressões antrópicas sobre o entorno da REBIO do Gurupi.

As análises apontam que entre 1985 e 2020 houve uma redução progressiva das áreas que se mantivera na classe da Formação Florestal, que passou de 92,48% para 76,2% da área total. Essa diminuição foi mais acentuada entre 2000 e 2005, quando a cobertura florestal caiu cerca de 5,2% percentuais, indicando um período de intensa conversão da vegetação natural. Em relação as transformações relacionadas a emissão e remoção de carbono, entre 2010 e 2015, o desmatamento e as queimadas responderam por 44% das emissões de carbono. A regeneração florestal aumentou entre 2015 e 2020, representando 79% das remoções de carbono.

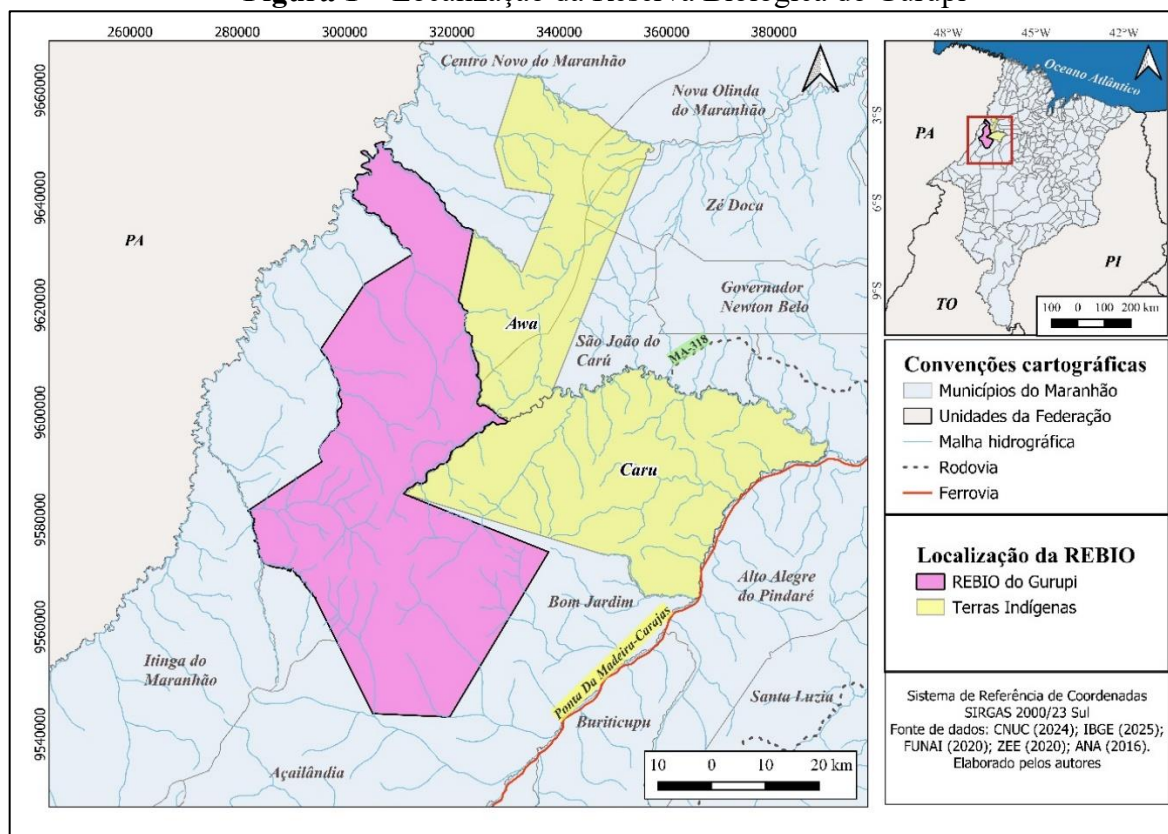
Este trabalho tem fundamental importância para a comunidade científica, uma vez que pode subsidiar ações de conservação e políticas públicas de mitigação das mudanças microclimáticas, especialmente em regiões críticas da Amazônia. Ao evidenciar as relações entre o uso e a cobertura da terra, as emissões e remoções de carbono e a influência das queimadas, o estudo contribui para a compreensão das dinâmicas ambientais em UCs sob pressão antrópica como a Reserva Biológica do Gurupi.

⁶ Este trabalho faz parte da dissertação da primeira autora intitulada “Uso e cobertura da terra com incidência de queimadas na Reserva Biológica do Gurupi entre os anos de 1985 a 2020”, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço (PPGEO) da Universidade Estadual do Maranhão. Teve financiamento de bolsa de pesquisa pela CAPES (Processo nº 88887.688260/2022-00). A dissertação pode ser encontrada em <https://www.ppgeo.uema.br/2024/02/defesas-2024/>.

METODOLOGIA

A área de estudo compreende a Reserva Biológica do Gurupi (REBIO), uma Unidade de Conservação de Uso Integral situada na região Nordeste do Brasil, no estado do Maranhão, no bioma amazônico (ICMBIO, 2020). A unidade possui aproximadamente 2.711,82 km² (Celentano *et al.*, 2017) e abrange três municípios sendo eles: Centro Novo do Maranhão (59,08%), Bom Jardim (35,59%) e São João do Carú (5,33%) (Silva-Júnior *et al.*, 2020). A REBIO possui proximidade com as Terras Indígenas (TI's) Awa e Carú, que segundo De Oliveira Hessel; Lisboa (2015), as três áreas juntas formam um grande mosaico florestal de grande relevância social e ecológica para a região. A Figura 1 mostra a localização geográfica da REBIO.

Figura 1 – Localização da Reserva Biológica do Gurupi



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A metodologia desta pesquisa baseou-se em uma ampla revisão bibliográfica, abrangendo artigos científicos, livros, dissertações, teses, legislações e relatórios técnicos. As fontes de dados foram coletadas em plataformas como CAPES, Google Acadêmico, Scielo, Scopus e ResearchGate, além de instituições e bases de dados nacionais, como a Universidade



Estadual do Maranhão (UEMA), a Universidade Federal do Maranhão (UFMA), o Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC) e o Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Maranhão (ZEE-MA).

Na etapa seguinte, realizou-se a aquisição, o processamento e a análise de dados geoespaciais de uso e cobertura da terra e de áreas queimadas, obtidos pelo Projeto MapBiomass (Coleção 8). Os arquivos raster (GeoTIFF) e vetoriais (Shapefile) foram processados nos softwares QGIS 3.24 e ArcMap 10.5. A escolha do MapBiomass como base principal justifica-se pela alta precisão do produto, que apresenta acurácia de 82,4% e abrange uma ampla série temporal, desde 1985 até os anos mais recentes (MAPBIOMASS, 2023).

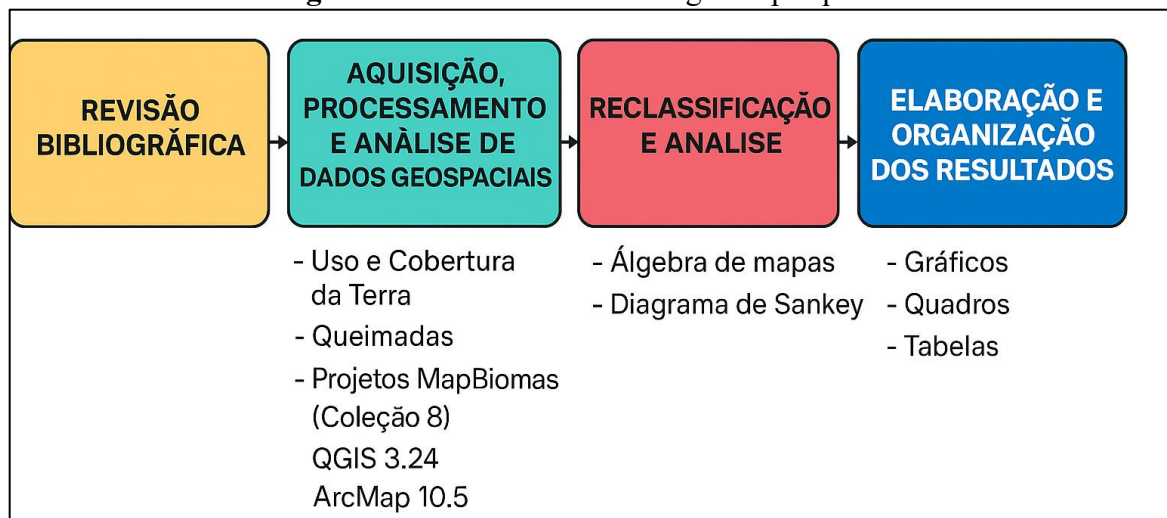
Os valores de pixel correspondentes a cada classe de uso e cobertura da terra foram mensurados por meio do cálculo de área, convertendo a contagem de pixels em quilômetros quadrados (km²). Para isso, cada célula foi multiplicada por 0,0009 — fator de conversão referente à área de um pixel em km² dividida por 1.000.000.

Posteriormente, os valores foram reclassificados por meio de álgebra de mapas no ArcMap, conforme a metodologia proposta por Souza (2024). Essa etapa permitiu identificar áreas de perda (ex.: desmatamento) e de ganho (ex.: regeneração) de cobertura vegetal. A integração das camadas por década possibilitou simplificar as classes segundo a tipologia do MapBiomass. A contagem de pixels foi convertida em área (km²) e as porcentagens de cada classe foram calculadas com base na área total analisada.

Os dados de queimadas foram obtidos a partir da Coleção 2 do MapBiomass Fogo e processados na plataforma *Google Colaboratory*, utilizando códigos em *Python* integrados ao *Google Earth Engine (GEE)*. Os pixels foram reclassificados em áreas queimadas (1) e não queimadas (0), no período de 1985 a 2020. Para compreender a sobreposição entre as queimadas e as mudanças no uso e cobertura da terra, realizou-se a multiplicação dos rasters de cobertura com os rasters de fogo, gerando um produto combinado.

Esses dados foram posteriormente importados para o RStudio, onde foi elaborado um Diagrama de Sankey, que representa visualmente os fluxos entre as classes (Formação Florestal, Pastagem, Desmatamento e Regeneração), conforme Antunes *et al.* (2019). Por fim, os resultados foram organizados em gráficos e tabelas elaborados no *Microsoft Excel*, com o objetivo de facilitar a análise e a interpretação dos dados. A Figura 2 sintetiza, de forma esquemática, os procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa.

Figura 2 – Síntese da metodologia da pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

REFERENCIAL TEÓRICO

Nas últimas décadas, a Amazônia Legal tem experimentado intensas transformações resultantes do incentivo à ocupação territorial e da implementação de projetos de desenvolvimento socioeconômico (Becker, 2004). Tais processos vêm provocando profundas consequências para a região, especialmente no que se refere à conservação da biodiversidade e à manutenção dos serviços ecossistêmicos. Entre os principais impactos destacam-se a remoção da cobertura vegetal nativa, o aumento das queimadas e incêndios irregulares e, consequentemente, a intensificação das emissões de carbono.

Na Amazônia Maranhense, o desmatamento intensificou-se a partir da década de 1960, alterando significativamente a configuração espacial da cobertura florestal. Conforme Silva-Júnior *et al.* (2022), a fragmentação das áreas de vegetação ampliou as zonas de borda, tornando o bioma mais vulnerável à propagação do fogo. Estima-se que cerca de 74% da área total da região já tenha sido desmatada, principalmente em decorrência das atividades agropecuárias, destacando-se a agricultura e a pecuária. A remoção de florestas secundárias, por sua vez, ocorre de forma mais intensa do que a das florestas primárias, devido ao menor grau de proteção e fiscalização.

O avanço do desmatamento está fortemente associado à expansão de *commodities* voltadas para a produção de carne bovina, soja e eucalipto (Sodré, 2017). Essa dinâmica econômica conecta o Maranhão a municípios do Pará, como Paragominas, Dom Eliseu e Marabá, por meio de redes produtivas e logísticas que ampliam as pressões sobre os ecossistemas amazônicos. Historicamente, essa retirada da cobertura vegetal nativa foi



justificada em nome do desenvolvimento econômico (Celentano *et al.*, 2018), porém, longe de gerar benefícios sociais amplos, resultou em degradação ambiental, aumento da pobreza e agravamento dos conflitos fundiários.

Nesse cenário, as áreas protegidas, como a Reserva Biológica (REBIO) do Gurupi, assumem papel estratégico na mitigação das emissões de carbono, pois funcionam como sumidouros naturais, que são locais de estocagem e sequestro de carbono. Contudo, essas unidades também enfrentam severas pressões antrópicas e fragilidades institucionais que comprometem sua função ecológica. Segundo o INPE (2023), a REBIO do Gurupi concentrou cerca de 20% dos focos de queimadas registrados no bioma amazônico maranhense nas últimas duas décadas. As queimadas na REBIO estão frequentemente associadas ao manejo de pastagens e à expansão do monocultivo de soja em seu entorno (Garbado; Sarzedas; Da Silva, 2021), gerando incêndios descontrolados que reduzem a cobertura vegetal e comprometem o equilíbrio do ciclo do carbono.

A relação entre desmatamento, fogo e emissões de carbono é direta: a supressão da vegetação e as queimadas liberam grandes quantidades de dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO) na atmosfera, reduzindo o potencial de sequestro de carbono e contribuindo para o agravamento do efeito estufa (Santos *et al.*, 2020). O carbono, presente na atmosfera sob a forma de CO_2 , é um elemento essencial do ciclo biogeoquímico terrestre, pois participa da fotossíntese e da formação de biomassa vegetal, processos que garantem a fixação e remoção do carbono (Gouvello; Soares Filho; Nassar, 2010).

Nas florestas amazônicas, a remoção de CO_2 ocorre quando há crescimento da vegetação, que converte o dióxido de carbono atmosférico em carbono fixado na biomassa e libera oxigênio. Por outro lado, as emissões decorrem da queima da matéria orgânica e da decomposição, processos que liberam novamente o carbono para a atmosfera. Em áreas como a REBIO do Gurupi, onde o desmatamento e as queimadas ainda ocorrem em algumas áreas, principalmente em seu entorno, há uma inversão desse balanço: o que antes era um sumidouro de carbono transforma-se em fonte emissora, reduzindo a capacidade de regulação climática da floresta.

A mudança no uso e cobertura da terra afeta, portanto, os reservatórios naturais de carbono, os sumidouros e os sequestradores de carbono, interferindo diretamente no ciclo global e elevando a concentração atmosférica de CO_2 . Segundo Gouvello, Britaldo e Nassar (2010), a conversão de florestas em áreas agrícolas é uma das principais responsáveis pelas emissões globais de carbono, uma vez que cada floresta representa um estoque significativo desse elemento. Assim, a degradação florestal na REBIO do Gurupi não se restringe à perda de



biodiversidade, mas representa também uma perda expressiva de capacidade de mitigação climática.

De acordo com Souza (2024), esses desafios revelam a complexidade de quantificar e controlar as emissões em áreas protegidas, especialmente diante de conflitos fundiários, pressões econômicas e limitações de fiscalização. Para a autora, as medições imprecisas do desmatamento e das queimadas podem subestimar o volume real de carbono emitido, exigindo o fortalecimento das políticas públicas de monitoramento, recuperação florestal e manejo sustentável. A conservação da REBIO do Gurupi, portanto, é essencial não apenas para a proteção da biodiversidade, mas também para a regulação microclimática e o equilíbrio do ciclo do carbono regional.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Transformações das classes de uso e cobertura da terra

De acordo com as análises da dinâmica das classes obtidas pelo Projeto MapBiomas, coleção 8 (2023), observou-se que as mudanças entre as classes ocorreram de forma dinâmica ao longo dos anos. Em relação as classes de transformação, as análises apontaram que entre 1985 e 2020 houve uma redução progressiva das áreas que se mantivera na classe da Formação Florestal, que passou de 92,48% para 76,2% da área total. Essa diminuição foi mais acentuada entre 2000 e 2005, quando a cobertura florestal caiu cerca de 5,2% percentuais, indicando um período de intensa conversão da vegetação natural.

Em contrapartida, áreas que permaneceram na classe da Pastagem apresentaram crescimento contínuo, aumentando de 3,45% em 1985 para 13,03% em 2020, refletindo a expansão das atividades agropecuárias sobre áreas antes florestadas. Com base nisso, infere-se que as áreas desmatadas (conversão Floresta para Pastagem) oscilaram ao longo das décadas, com picos entre 2000 e 2005 (5,80%) e redução posterior para 2,11% em 2020.

A Regeneração (conversão Pastagem para Floresta) apresentou comportamento inverso ao desmatamento, crescendo de 0,88% em 1985 para 8,61% em 2020, especialmente após 2010, quando o percentual mais que dobrou. Essa tendência indica processos de recuperação florestal em áreas anteriormente degradadas ou queimadas. Já as classes de Formação Savânica, Formação Campestre, Silvicultura e Outras Lavouras Temporárias, identificadas pelo MAPBIOMAS, representaram índices abaixo de 1%, como mostra a Tabela 1.



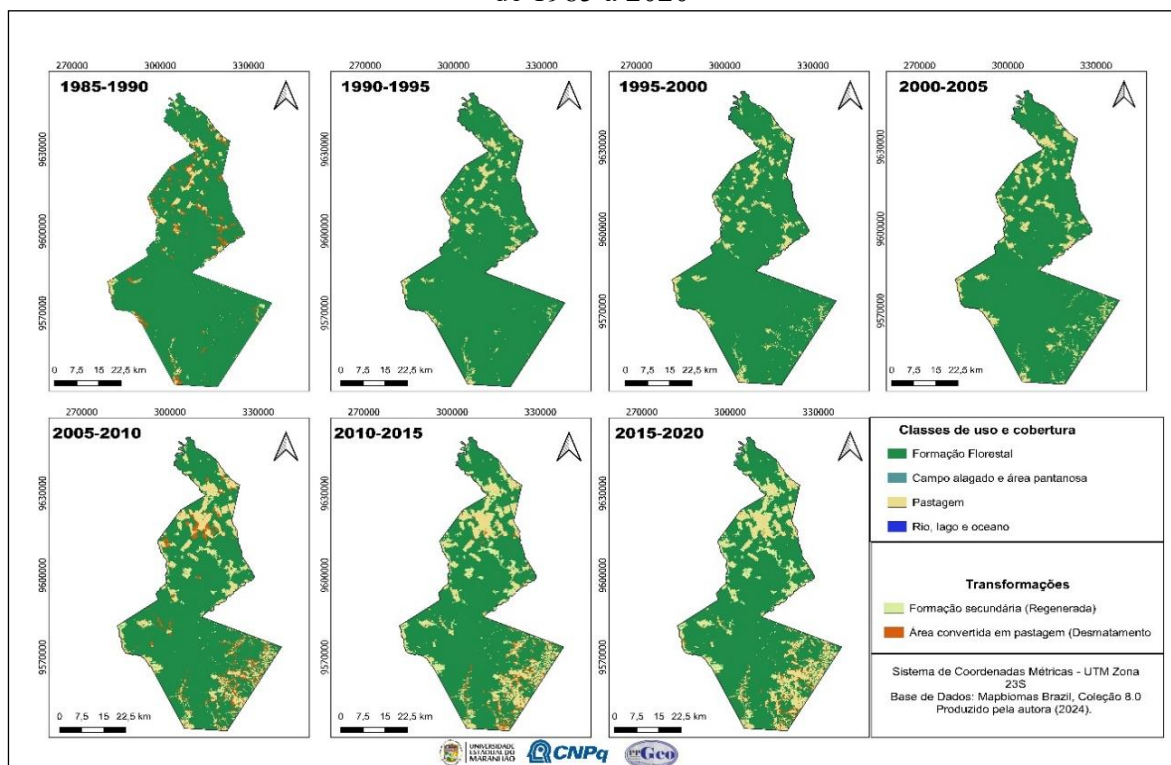
Tabela 1 – Porcentam das classes de transformações na Reserva Biológica do Gurupi entre 1985 a 2020

Classe	1985-1990	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020
Formação Florestal	92,48%	90,8%	88,59%	83,39%	79,29%	77,09%	76,2%
Campo Alagado e Área Pantanosa							
Pastagem	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
Pastagem	3,45%	5,66%	7,05%	9,05%	12,93%	14,45%	13,03%
Rios, lagos e oceanos	0%	0,03%	0,03%	0,04%	0,04%	0,04	0,04%
Regeneração	0,88%	0,97%	0,61%	1,71%	3,29%	(5,83	8,61%
Desmatamento	3,18%,	2,54%	3,72%	5,80%	4,44%	2,58%	2,11%

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Verifica-se que as áreas desmatadas e regeneradas localizaram-se próximas à Pastagem, ao norte da reserva e na porção oeste, nos municípios de Centro Novo do Maranhão e Bom Jardim. De modo geral, observa-se que as transformações na paisagem refletem a substituição gradual da vegetação nativa por pastagens, seguida por um recente avanço da regeneração em resposta às dinâmicas de uso da terra e ao manejo ambiental da REBIO, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Transformação dos usos e da cobertura da Terra na Reserva Biológica do Gurupi de 1985 a 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).



Incidência das queimadas nas classes de uso e cobertura da terra

A dinâmica das queimadas nas classes de uso e cobertura da terra ocorridas dentro da Reserva Biológica foi avaliada para o período de 1985 a 2020, em intervalos de cinco anos. Observou-se que as áreas mais afetadas pelo fogo ao longo do tempo são os pixels de Formação Florestal e Pastagem, destacando as transformações causadas pelo fogo.

As queimadas na REBIO do Gurupi ocorreram de forma pontual, afetando pequenas áreas distribuídas por toda a unidade, enquanto a grande maioria da reserva permaneceu sem registros expressivos. Ao longo do período analisado (1985–2020), a Formação Florestal apresentou a menor incidência de queimadas (0,01%), seguida por áreas regeneradas (0,04%) e Pastagem (0,03%), enquanto os pontos de áreas que passaram por desmatamento também foram afetados.

Entre 1990 e 2010, a tendência geral mostrou variações nas áreas afetadas pelo fogo. Nos primeiros anos, houve um aumento das queimadas na Formação Florestal e na Pastagem, enquanto a Regeneração apresentou redução temporária. Entre 2000 e 2005, a Formação Florestal foi a classe mais impactada, seguida por Pastagem e Desmatamento, embora mais de 98% da reserva permanecesse sem registros de queimadas. A década seguinte (2005-2010) registrou uma redução na incidência de fogo, com leve aumento nas áreas não afetadas.

O período de 2010 a 2015 apresentou a maior incidência de queimadas, especialmente na Formação Florestal (6,48%) e Pastagem (4,52%), com aumento também em Regeneração e Desmatamento. Contudo, no último intervalo analisado (2015-2020), houve uma redução significativa, com cerca de 99,8% da área total da reserva sem ocorrência de queimadas. Esses dados indicam que, embora as queimadas tenham sido pontuais e concentradas, a Formação Florestal foi a mais afetada em momentos críticos, refletindo a dinâmica espacial e temporal do fogo na REBIO do Gurupi. A Tabela 2 detalha a porcentagem das queimadas por classes de transição.

Tabela 2 – Classes e porcentagem de queimadas nas classes de transição entre 1985 a 2020

CLASSES	1985-1990	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2015-2020
Sem queima	99,92%	99,40%	98,95%	98,03%	98,68%	87,43%	99,8%
Formação Florestal	0,01%	0,25%	0,39%	0,73%	0,31%	6,48%	0,04%
Pastagem	0,03%	0,22%	0,32%	0,52%	0,60%	4,52%	0,11%
Regeneração	0,00%	0,01%	0,00%	0,04%	0,04%	0,73%	0,01%
Desmatamento	0,44%	0,11%	0,33%	0,68%	0,37%	0,84%	0,04%

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

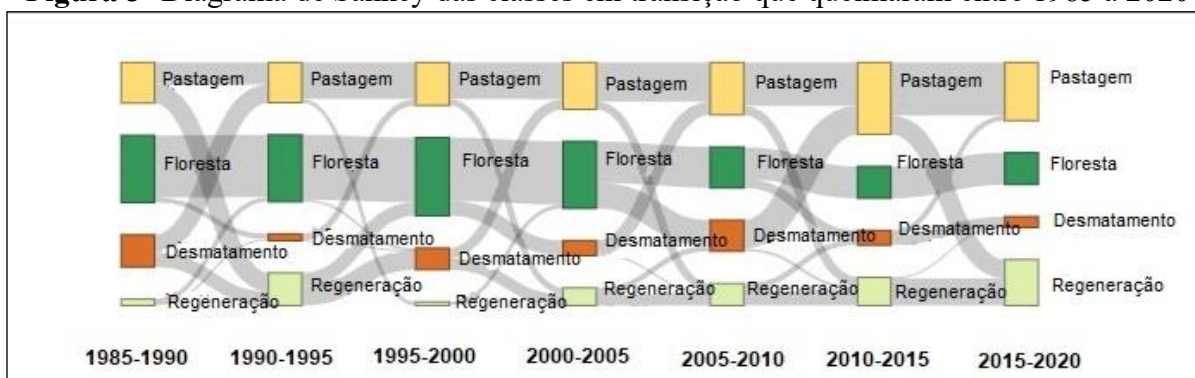
Transformações das Classes de Uso da Terra em Função das Queimadas: Análise pelo Diagrama de Sankey

O Diagrama de Sankey ilustra as transformações ocorridas nas classes Formação Florestal, Pastagem, Desmatamento e Regeneração ao longo do tempo. As barras cinzas representam a estabilidade ou as mudanças dentro de cada classe ao longo dos intervalos analisados. Observa-se que as classes Formação Florestal e Pastagem foram as que mais se expandiram, evidenciadas pelas maiores barras e fluxos de transição no diagrama.

Ao detalhar os impactos do fogo, nota-se que a Pastagem manteve a maior parte das áreas queimadas dentro da mesma classe em todos os anos, com pequenas incidências em áreas de Regeneração e Formação secundária, principalmente nos intervalos 1990–1995 e 2015–2020. A Formação Florestal apresentou fluxos significativos dentro da própria classe e em áreas queimadas durante processos de Desmatamento, com destaque para os períodos 2000–2005 e 2005–2010.

No caso do Desmatamento, os fluxos de queimadas ocorreram dentro da própria classe, para Pastagem e para Regeneração, sendo os maiores fluxos de transição para a Pastagem registrados entre 2005–2010 e 2010–2015. Já a classe Regeneração apresentou fluxos internos e trocas com áreas florestadas e de desmatamento, com maior intensidade nos intervalos 1990–1995 e 1995–2000. A Figura 3 apresenta o Diagrama de Sankey que resume essas transformações das classes durante os eventos de fogo.

Figura 3- Diagrama de Sankey das classes em transição que queimaram entre 1985 a 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Variação das áreas de emissão e remoção de carbono

Analisando o comportamento das transformações ocorridas na REBIO pelas taxas de área queimada, desmatada e regenerada, verificou-se que, no período compreendido entre os



anos de 1985 a 1990, cerca de 23,94 km² (21%) de áreas regeneradas contribuíram para a remoção (R) de carbono, enquanto 88,32 km² (79%) das áreas queimadas e desmatadas contribuíram para as emissões (E), resultando em um desequilíbrio. A diferença entre as áreas de remoção e emissão foi de 64,38 km² (57%), com saldo negativo, pois houve mais áreas de emissão do que de remoção.

Entre os anos de 1990 a 1995, as áreas de emissão continuaram a superar as áreas de remoção. A remoção foi de 26,35 km² (24%), enquanto a área de emissão foi de 85,02 km² (76%). De modo geral, a diferença entre as taxas E-R foi de 53%, correspondendo a 57,67 km², índice menor que o intervalo anterior.

De 1995 a 2000, cerca de 16,54 km² (11%) de áreas de regeneração contribuíram para a remoção de carbono da atmosfera, enquanto as áreas de emissões quase que duplicaram em relação ao ano anterior, com 129,35 km² (89%) de áreas desmatadas e queimadas. A variação resultou em 77% (112,8 km²) da diferença entre emissão e remoção.

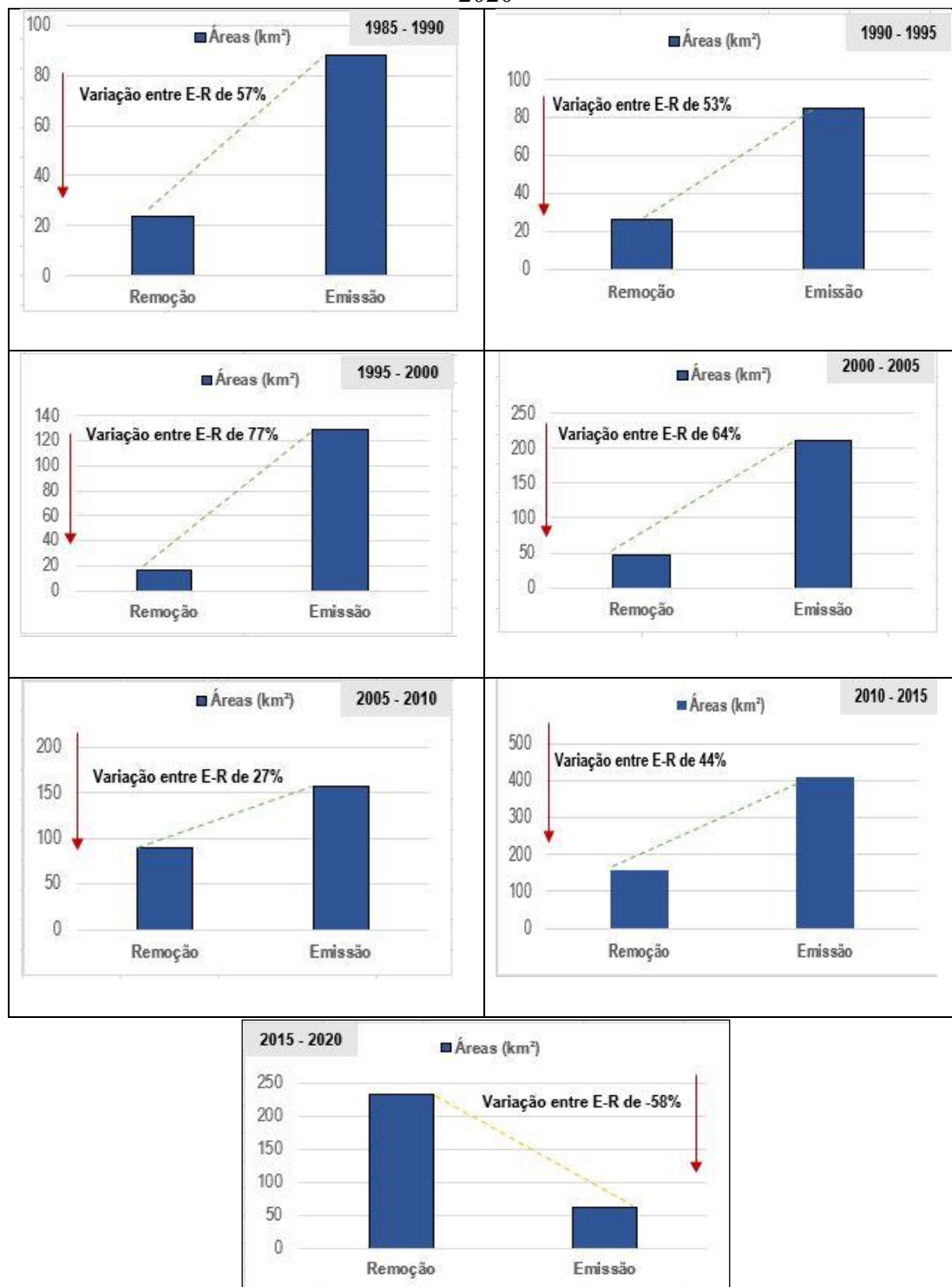
Nos anos de 2000 a 2005, houve aumento das áreas que contribuíram para a remoção de carbono, apesar das emissões continuarem crescendo. As áreas regeneradas aumentaram para 46,46 km² (18%), e as áreas desmatadas e queimadas juntas resultaram em 210,73 km² (82%), com 64% de áreas que emitiram carbono (164,27 km²).

Entre 2005 e 2010, as áreas de regeneração quase dobraram em relação ao período anterior, contabilizando cerca de 89,3 km² (3%) de áreas de remoção de carbono. As áreas que contribuíram para a emissão reduziram para 156,27 km² (64%) através do desmatamento e das queimadas. Apesar da redução das áreas de emissões, estas superaram as áreas que removeram carbono, com cerca de 27% de diferença (66,97 km²) entre áreas de emissão e remoção.

Com ritmo de crescimento em relação ao intervalo anterior, a área de remoção de carbono entre 2010 e 2015 foi de 158,06 km² (28%), menor que a área que contribuiu para a emissão. As queimadas e o desmatamento tiveram 411,08 km² (72%) do total de áreas que auxiliaram para a emissão. A área de emissão foi de 253,01 km² (44%), saldo superior ao período anterior.

No último intervalo (2015 a 2020), verificou-se o cenário inverso aos anos anteriores: a área que contribuiu para a remoção superou as áreas de emissão, com 233,46 km², equivalendo a 79% da área total. A área de emissão foi de 21% (62,73 km²), um valor em queda. A porcentagem manteve-se em queda de 58% (170,73 km²). A Figura 4 expressa a área em km² entre emissões e remoções para os anos estudados.

Figura 4 - Gráficos de distribuição entre Emissões e Remoções de carbono entre 1985 a 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Síntese dos resultados

De acordo com Miranda (2017), a transformação intensiva da cobertura florestal na região teve início a partir de 2005, impulsionada principalmente pela extração seletiva de



madeira, prática que aumentou a inflamabilidade da floresta e, consequentemente, o risco de incêndios florestais. Esse processo está diretamente relacionado às atividades de pecuaristas, madeireiros, assentados e pequenos produtores, concentrados majoritariamente na porção sul da REBIO, enquanto médias e grandes propriedades, localizadas nas regiões norte e central, intensificam as queimadas durante a renovação de pastagens e o preparo de áreas de roçado.

A interação entre as pressões antrópicas e a dinâmica atmosférica potencializou o avanço das queimadas, especialmente entre 2010 e 2020, período marcado pelo fortalecimento do fenômeno El Niño (2015–2016), que resultou em condições mais secas e propícias à propagação do fogo. Essa combinação de fatores naturais e humanos ampliou a escala e a frequência dos incêndios, contribuindo significativamente para o aumento das emissões de carbono na região.

Nas décadas anteriores, particularmente entre 1995 e 2005, as queimadas e o desmatamento apresentaram caráter contínuo, associados à exploração madeireira para comercialização, à expansão das áreas de pastagem e agrícolas e à implantação de assentamentos rurais. Esses processos foram determinantes para o aumento das emissões de carbono.

Já entre 2010 e 2015, o prolongamento de períodos de seca intensificou novamente os focos de fogo e o desmatamento, elevando as emissões atmosféricas. Em contrapartida, o declínio das emissões nos anos subsequentes pode estar relacionado à redução das áreas de pastagem e dos assentamentos ativos, favorecendo a regeneração natural e a recuperação de áreas desflorestadas, o que promoveu um aumento nas remoções de carbono em florestas secundárias.

Destaca-se que, a partir de 2012, políticas públicas como o Novo Código Florestal (Lei nº 12.651, de 25 de maio, de 2012) pode ter desempenhado um papel relevante na recuperação da vegetação nativa, ao estabelecer mecanismos de proteção e restauração ambiental, como a regularização de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais (Silva-Júnior, 2020). Além disso, o fortalecimento das ações de monitoramento por satélite e o aperfeiçoamento das políticas de controle do desmatamento contribuíram para reduzir a pressão antrópica sobre a REBIO e seu entorno.

Dessa forma, observa-se que a combinação de fatores climáticos e institucionais influenciou diretamente a dinâmica do carbono na região, indicando que a adoção de políticas ambientais eficazes, aliada à diminuição das atividades de desmatamento e queimadas, pode favorecer processos de revegetação e sequestro de carbono, essenciais para a mitigação das mudanças climáticas locais e regionais.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Reserva Biológica do Gurupi (REBIO), último remanescente significativo da Floresta Amazônica no Maranhão, tem sido fortemente impactada por projetos econômicos como a construção de rodovias, a exploração madeireira, a expansão de fazendas e a instalação de assentamentos rurais, mesmo sendo uma área legalmente protegida. Entre 1985 e 2015, observou-se uma expressiva redução da Formação Florestal e o aumento das áreas de Pastagem, sobretudo na porção sul da reserva, conforme apontam os dados do Projeto MapBiomias.

Durante esse processo, as áreas de regeneração natural desempenharam papel relevante na remoção de carbono da atmosfera, principalmente entre 2015 e 2020, quando se registrou um saldo positivo de remoção, indicando recuperação parcial de áreas anteriormente degradadas. Em contrapartida, as áreas desmatadas e queimadas continuaram a atuar como fontes de emissões, especialmente em períodos de estiagem prolongada e de intensificação das atividades antrópicas.

Os resultados evidenciam a complexidade socioambiental da REBIO do Gurupi e demonstram que a conservação efetiva da unidade depende da integração entre políticas públicas, fiscalização ambiental e incentivo à restauração florestal.

REFERÊNCIAS

ALVES, D. B.; ALVARADO, S. T. Variação espaço- temporal da ocorrência do fogo nos biomas brasileiros com base na análise de produtos de sensoriamento remoto. **Geografia**, v. 44, n. 2, p. 321-345, 2019.

ANTUNES, J. F. G. *et al.* Análise das mudanças do uso e cobertura da Terra no estado de Mato Grosso por meio do geoportal terraclass. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro do Sensoriamento Remoto**. INPE, Santos-SP, 2019.

BECKER, B. K. **Amazônia**: geopolítica na virada do III milênio. Rio de Janeiro: Garamond, 2004.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**; decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002. Sistema Nacional de Unidade de Conservação da Natureza – SNUC: 3. ed. aum. Brasília: MMA/SBF, 2003.52p.

CELENTANO, D. *et al.* Towards zero deforestation and forest restoration in the Amazon region of Maranhão state, Brazil. **Land use policy**, v. 68, p. 692-698, 2017.

DE OLIVEIRA HESSEL, F.; LISBOA, E. A. Mapa do estado de conservação da Reserva Biológica do Gurupi: identificação das áreas conservadas e das áreas antropizadas. Rio



Grande do Sul - Brasil. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, João Pessoa-PB, Brasil, v. 25, 2015.

GABARDO, G.; SARZEDAS, C. G.; DA SILVA, H. L. **Queimadas na Amazônia brasileira: Brasil em chamas. A educação ambiental em uma perspectiva interdisciplinar**. v. 4, 2021. Disponível em: <<https://downloads.editoracientifica.org/articles/200800872.pdf>>. Acesso em: 20 de fev. 2023.

GOUVELLO, C.; SOARES-FILHO, B. S.; NASSAR, A. Estudo de Baixo Carbono para o Brasil - Uso da Terra, **Mudanças do uso da terra e florestas**, 2010.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). **REBIO do Gurupi**, 2020. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomasbrasileiros/amazonia/unidades-de-conservacao-amazonia/1998-rebio-do-gurupi>>. Acesso em: 10 de fev. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Programa Queimadas**, 2023. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/deter/pdfs/relatoriomonitoramento.pdf>>. Acesso em: 13 de mai. 2023.

MAPBIOMAS, **O projeto**, 2023. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 12 jun. 2023.

MESQUITA, B.; COUTINHO, B.; NAMIKAWA, I.; PEREIRA, M.; ARMELIN, M.; Dias, Tulio. **Diálogo do Uso do Solo - Centro de Endemismo Belém (CEB) Resumo dos Co-Líderes**, 2019. Disponível em: <https://dialogoflorestal.org.br/wpcontent/uploads/2020/03/Cochairs_Summary_Final_PT.pdf>. Acesso em: 12 de mar. 2021.

MIRANDA, M. V. C. *et al.* Análise temporal das alterações na cobertura florestal na REBIO do Gurupi (Maranhão) utilizando dados do DETER– B de 2012 a 2015. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto– SBSR**. INPE, 2017.

PEREIRA, F.S.; VIEIRA, IC. G. Transformação antrópica na bacia do rio Gurupi, Amazônia oriental. **Sustentabilidade em Debate**, [S. l.], v. 10, n. 3, pág. 212–235, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.unb.br/index.php/sust/article/view/23799>>. Acesso em: 10 de dez. 2021.

ROSAN, T. M. **Estimativa de emissões de CO2 por desmatamento e degradação florestal utilizada como subsídio para definição de municípios prioritários para monitoramento e controle**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE: São José dos Campos SP, Brasil, 2017.

SANTOS, J. R. N. *et al.* Tendências de extremos climáticos na região de transição Amazônia-Cerrado no Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020.

SANTOS, T. O. *et al.* Os impactos do desmatamento e queimadas de origem antrópica sobre o clima da Amazônia brasileira: um estudo de revisão. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 11, n. 2, p. 157-181, 2017.



SILVA-JUNIOR, C. HL *et al.* Forest Fragmentation and Fires in the Eastern Brazilian Amazon–Maranhão State, Brazil. **Fire**, v. 5, n. 3, p. 77, 2022.

SILVA-JUNIOR, C. HL *et al.* Amazon forest on the edge of collapse in the Maranhão State, Brazil. **Land Use Policy**, v. 97, p. 104806, 2020.

SODRÉ, R. Barros; SAMPAIO, J. M. J.. **Contradições e possibilidades nos conflitos por terra: o caso do maranhão**. ENANPEGE, p. 1-11, 2017.

SOUZA, J. C. B. Uso e cobertura da Terra com incidência de queimadas na Reserva Biológica do Gurupi entre os anos de 1985 a 2020. Dissertação (**Mestrado em Geografia**) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2024, p. 1-96.