



# Nota metodológica do Sistema de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa no Brasil (1990-2023): **Mudanças de Uso da Terra e Florestas (MUT)**

SEEG Setor Mudanças de Uso da Terra e Florestas 1990-2023

Versão 12 – novembro de 2024

Coordenação Técnica  
Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM)

Equipe Responsável  
Bárbara Zimbres; Edriano Souza; Julia Shimbo; Camila Silva; Celso H. L. Silva-Junior;  
Ane Alencar; Amintas Brandão Jr; Wallace Silva; Aline P. Lopes; Letícia Gomes; Jéssica Schuler;  
Fernando Elias; Dhemerson Conciani; Felipe Lenti; Vera Arruda; Tasso Azevedo



# Sumário

<b>1. Introdução</b>	<b>4</b>
Escopo do setor	5
Descrição dos biomas	6
Processos contabilizados nas emissões e remoções	9
<b>2. Método de cálculo</b>	<b>13</b>
Equações de cálculo - IPCC	13
SEEG 12: abordagem para calcular as emissões	14
Máscaras de desmatamento e regeneração	15
Estabilização das coberturas anuais	16
Geração das transições ano a ano	17
Cálculo zonal das emissões e remoções	18
Correspondência entre classes de vegetação	18
Estoque e incremento em vegetação nativa primária	19
Estoque e incremento em vegetação nativa secundária	34
Estoque e incremento em classes de uso antrópico	35
Cálculo das emissões por queima de resíduos florestais	37
Carbono orgânico do solo	37
Organização dos resultados	40
Emissões por queimadas não associadas ao desmatamento	41
Cálculo das emissões em carbono equivalente (CO <sub>2</sub> e)	48
<b>3. Quadro de qualidade dos dados</b>	<b>50</b>
<b>4. Diferenças para o inventário nacional e estimativas de emissões oficiais</b>	<b>54</b>
<b>5. Resultados</b>	<b>55</b>
<b>6. Referências</b>	<b>65</b>
<b>Anexo 1 - Cálculo das emissões por degradação</b>	<b>69</b>
<b>Anexo 2 - Tipos de transição e as equações do SEEG 12</b>	<b>90</b>

# 1. Introdução

Neste documento apresentamos os procedimentos metodológicos da décima segunda coleção do SEEG para calcular as estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil para o setor de mudanças de uso da terra e florestas (MUT), no período de 1990 a 2023. O cálculo das estimativas de emissões foi atualizado com a série temporal mais completa de mapas anuais de cobertura e uso da terra da Coleção 9 do MapBiomas<sup>1</sup> (<http://mapbiomas.org/>) e nos métodos e fatores publicados no Quarto Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de GEE (MCTI, 2020) associado à proposta metodológica do IPCC (2003; 2006). As estimativas das emissões de queima de resíduos florestais foram calculadas de acordo com as áreas de desmatamento, após considerar a retirada de madeira em lenha e madeira em tora das áreas desmatadas, e com a aplicação dos fatores de cálculo (combustão e emissão por tipo de vegetação e por bioma) segundo o Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020).

A novidade desta edição foi o uso do produto de desmatamento e vegetação secundária do MapBiomas Coleção 9 como o dado de entrada para o presente método, e que consiste em uma máscara para selecionar as áreas de desmatamento e regeneração da vegetação nativa. Até a coleção passada (SEEG 11), o SEEG produzia sua própria máscara de desmatamento e regeneração com regras mais conservadoras para inclusão dessas áreas. Estes dados do MapBiomas foram aperfeiçoados ao longo das coleções e na Coleção 9 inclusive foi adicionado o último ano da série, passando o SEEG agora a adotar esse dado como parte de seu método. A única diferença para o dado de desmatamento e vegetação secundária do MapBiomas é a aplicação de um filtro espacial adicional para exclusão de pixels isolados. Essa mudança permitiu com que não fosse mais necessária a correção para o desmatamento do último ano, conforme realizado até o SEEG 11. O único bioma para o qual foi feita essa correção do desmatamento no último ano foi a Caatinga. Todos os detalhes deste novo método estão descritos mais adiante nesta Nota Metodológica do SEEG 12.

Também foram atualizadas as estimativas das emissões de gases de efeito estufa de queimadas em vegetação nativa, especialmente em florestas e savanas, não associadas

---

<sup>1</sup> O MapBiomas é um projeto de mapeamento anual da cobertura e uso da terra do Brasil, que envolve uma rede colaborativa de instituições locais como universidades, ONGs e empresas de tecnologia. É uma iniciativa do Observatório do Clima que utiliza imagens Landsat, processamento em nuvem e classificadores automatizados na plataforma Google Earth Engine para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil desde 1985 até o presente.

ao desmatamento no Brasil, no período de 1990 a 2023 (Anexo 2). Tais emissões ainda não são contabilizadas no Inventário Nacional, devido ao alto grau de incerteza, em especial no que tange à regeneração da vegetação nativa em áreas queimadas e suas trajetórias de sucessão. Por esse motivo, essas emissões são apresentadas na plataforma do SEEG como Emissões NCI (Não Contabilizadas no Inventário) (<https://plataforma.seeg.eco.br/>), com dados para o Brasil, estados e municípios. No SEEG 12, o cálculo dessas emissões foi refinado utilizando os valores dos estoques de biomassa e necromassa acima do solo obtidos pelo Quarto Inventário, fatores de combustão revisados na literatura apropriados para queima de biomassa e necromassa em vegetação nativa, além dos mapas anuais de áreas queimadas da Coleção 3 do MapBiomas Fogo e de cobertura e uso da terra da Coleção 9 do MapBiomas. Além disso, o SEEG implementou um modelo para estimar as emissões líquidas por incêndios, resultantes do balanço entre o processo de mortalidade de árvores e regeneração da vegetação nos anos que sucedem o fogo. Essas emissões pós-fogo foram apresentadas pela primeira vez no SEEG 9, apenas para as formações florestais na Amazônia. No entanto, no SEEG 12 são apresentadas emissões líquidas de CO<sub>2</sub> para florestas, savanas e vegetação campestre de todos os biomas. Adicionalmente, apresentamos pela primeira vez uma série histórica de emissões relacionadas a outros dois vetores de degradação: efeito de borda e corte seletivo, este último apenas a partir de 2017. Essas estimativas ainda não estão incluídas como Emissões NCI, como as queimadas em vegetação nativa, mas são apresentadas na forma de um exercício preliminar no Anexo 1 (Box X).

## Escopo do setor

O setor de mudanças de uso da terra e florestas reporta as emissões brutas e líquidas de GEE relacionadas aos processos de mudanças dos estoques de biomassa e matéria orgânica existentes acima e abaixo do solo, além de emissões por queima de resíduos florestais.

Para gerar as estimativas do setor são necessárias duas informações principais: mapas de cobertura e uso da terra e informações sobre o estoque e incremento de carbono por classe de vegetação e uso. Na ausência de mapas anuais oficiais e atualizados de cobertura e uso da terra dos Inventários Nacionais, o SEEG utilizou dados anuais de uso e cobertura da terra do MapBiomas Coleção 9 para cálculo das áreas de transição e suas respectivas estimativas de emissões e remoções de GEE. Os mapas anuais de cobertura e uso da terra utilizados abrangem todo o Brasil e são produzidos a partir de imagens de satélite Landsat (com 30 m de resolução) para o período de 1985 a 2023. Esses mapas são utilizados no cálculo das áreas de mudança (transição) entre as categorias de cobertura e uso da terra.

Os dados de estoque e incrementos de carbono são gerados com base em amostras de campo (na maioria dos casos), em dados disponíveis na literatura e/ou em imagens de sensores remotos. É com base nessas estimativas de estoque e incremento de carbono por tipo de classe de cobertura e uso da terra, levantados pela Quarta Comunicação Nacional, que são aplicadas equações que convertem a área (extensão) de transição de uso e cobertura da terra em emissões de GEE. O Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020) publicou esses dados de estoque e incrementos de carbono, que são fatores médios por tipo de classe de cobertura e uso da terra por bioma.

## Descrição dos biomas

O Brasil é coberto por seis biomas (Figura 1). Além das diferenças biogeográficas que definem estes biomas, há condições específicas quanto aos tipos de vegetação, solos, condições climáticas e pressão humana. Essas características influenciam os estoques de carbono existentes e, conseqüentemente, a contribuição de cada bioma para as emissões do país. Por exemplo, o bioma Amazônia apresenta florestas com alta densidade de carbono em regiões com alta pressão por desmatamento. Isso aumenta a representatividade das emissões desse bioma em relação aos demais biomas brasileiros (Bustamante et al., 2018). O Cerrado também contribui criticamente, dada a continuidade da tendência de conversão de áreas extensas de vegetação nativa para produção agrícola e pecuária, acelerada nas últimas duas décadas (Alencar et al., 2020).

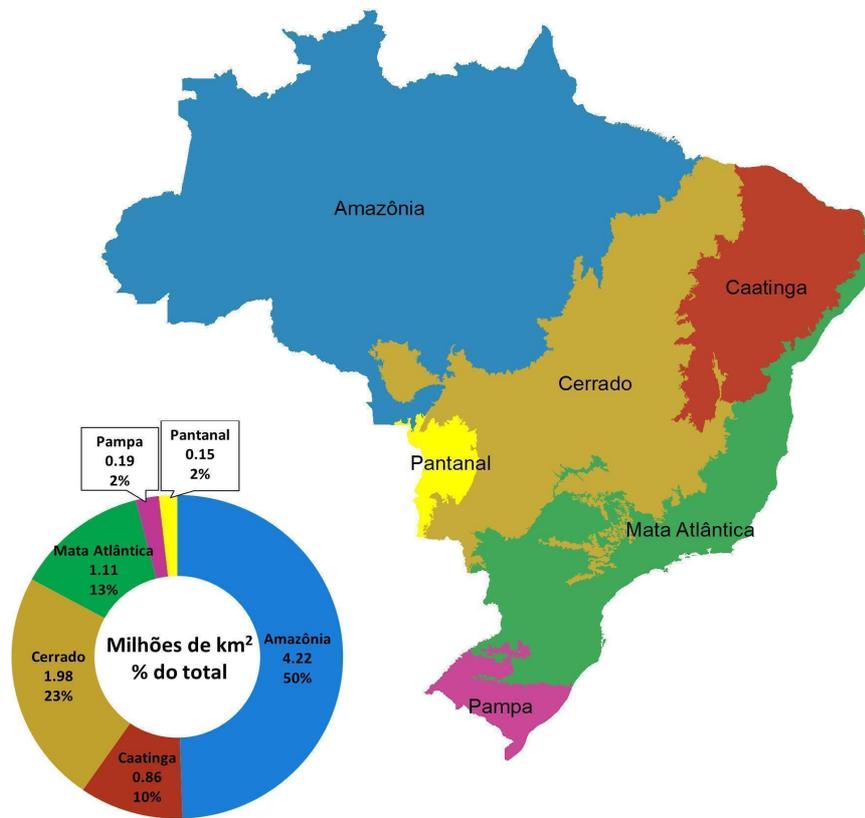


Figura 1. Limite e representatividade dos biomas brasileiros, em área (milhões de km<sup>2</sup>) e proporção da área do território Nacional (IBGE, 2019).

Os maiores biomas brasileiros são a Amazônia (50% da extensão do país), o Cerrado (23%) e a Mata Atlântica (13%). Os biomas Caatinga, Pampa e Pantanal cobrem os 14% restantes do território nacional (Figura 1).

- Amazônia** (4,22 milhões de km<sup>2</sup>, 50% do território nacional). Concentrando uma vasta biodiversidade, o bioma Amazônia abrange nove estados brasileiros e, com o predomínio de formações florestais, contém o maior estoque de carbono florestal do Brasil (MCTI, 2020). O mapeamento realizado pelo MapBiomias Coleção 9 contabilizou que em 2023 a Amazônia tinha cerca de 16% da área do bioma associados a usos antrópicos, como agricultura e pecuária. As taxas de desmatamento estão em uma tendência decrescente desde 2022. Depois do pico de 13.038 km<sup>2</sup> em 2021 foi observado um decaimento de 11%, chegando a 11.594 km<sup>2</sup> em 2022, e uma nova queda entre 2022 e 2023, de 22%, chegando a 9.064km<sup>2</sup>, segundo Prodes/INPE.

- **Cerrado** (1,98 milhões de km<sup>2</sup>, 23% do território brasileiro). Localizado na região central do Brasil, o Cerrado é o segundo maior bioma do país. Nele estão localizadas as três maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Amazônica/Tocantins, São Francisco e Prata). Além disso, essa região é considerada a savana com mais biodiversidade no mundo (MMA, 2013). Apresenta um mosaico de vegetação desde florestal, savânica a campestre com mais de 11 mil espécies de plantas nativas já foram catalogadas nessa área, além de inúmeras espécies de mamíferos, peixes, répteis e anfíbios. Apesar de sua importância, o Cerrado vem sofrendo várias pressões humanas, relacionadas principalmente à agricultura e pecuária. O bioma já perdeu cerca de 50% da área originalmente vegetada (MapBiomas Coleção 9), e, o desmatamento está em uma tendência crescente segundo o Prodes/INPE, com aumentos observados de 25% em 2022 (com 10.689 km<sup>2</sup>) e de 3% em 2023 (com 11.012 km<sup>2</sup>).
- **Mata Atlântica** (1,11 milhão de km<sup>2</sup>, 13% do território brasileiro). O terceiro maior bioma brasileiro possui somente 12,4% de sua cobertura de floresta original (SOS Mata Atlântica/INPE). O bioma Mata Atlântica é de extrema prioridade para a conservação da biodiversidade, com milhares de espécies endêmicas já catalogadas. Mais de 120 milhões de pessoas vivem nesse bioma, que também concentra 70% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. O bioma já perdeu 67% de sua cobertura natural (MapBiomas Coleção 9) e a pressão humana atualmente está associada à ampliação de infraestrutura e a processos industriais.
- **Caatinga** (863 mil km<sup>2</sup>). Representando 11% do território nacional, a Caatinga possui uma grande riqueza em biodiversidade apesar do clima semiárido. Ali vivem 27 milhões de pessoas (MMA, 2013). A pressão humana sobre o bioma está associada a atividades agrossilvopastoris e industriais. Até 2023, aproximadamente 40% da sua área já foi convertida (MapBiomas Coleção 9).
- **Pampa** (194 mil km<sup>2</sup>). Este bioma representa 2% da área brasileira. Restrito ao Rio Grande do Sul no Brasil, representa 63% da área do estado (MMA, 2013). Constituído principalmente de vegetação campestre, possui grande importância para a biodiversidade associada à fauna. Em relação à pressão humana, a pecuária extensiva e a soja, têm sido as principais atividades da região. Aproximadamente 47% do bioma Pampa no território brasileiro já foi perdido (MapBiomas Coleção 9).
- **Pantanal** (151 mil km<sup>2</sup>, cerca de 2% do território nacional). A maior planície alagada do planeta encontra-se no Pantanal. É o bioma mais preservado do país, mantendo 83% das áreas naturais em 2023 (MapBiomas Coleção 9). Essa região é considerada o berçário de várias espécies e abriga em abundância espécies consideradas ameaçadas em outros biomas. A pressão humana predominante é a

agropecuária (especialmente na região do Planalto) e é um dos biomas que mais vem sofrendo com o impacto das queimadas no Brasil.

## Processos contabilizados nas emissões e remoções

Os processos que geram emissões no setor de mudanças de uso da terra e florestas (Tabela 1) são:

- i. **Alterações de Uso da Terra.** As emissões ocorrem quando é alterada a cobertura para um uso da terra de menor estoque de carbono por hectare (IPCC, 2003). Por exemplo, a conversão de floresta para pastagem ou agricultura gera emissões de CO<sub>2</sub> pela perda de estoques de carbono na retirada da floresta.
- ii. **Queima de Resíduos Florestais.** Emissões por queima de biomassa florestal também geram emissões de outros GEEs não CO<sub>2</sub>, como N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> (esses gases possuem mais capacidade de acelerar o efeito estufa do que o dióxido de carbono). Tais emissões também foram contabilizadas nessa estimativa.

Tabela 1. Fontes de emissão de gases de efeito estufa contabilizados no setor mudanças de uso da terra e florestas.

Fonte de Emissão	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFC <sub>s</sub>	CF <sub>4</sub>	C2F <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	NMVOC
Transição de uso da terra										
Queima de resíduos										

Além dos processos que geram emissões, são contabilizadas as remoções de CO<sub>2</sub> da atmosfera oriundas das alterações de cobertura e uso da terra, entre eles:

- i. **Em florestas e campos manejados em áreas protegidas.** Segundo o Quarto Inventário (MCTI, 2020), no Brasil, as Unidades de Conservação (UCs) e Terras Indígenas (TIs) (Figura 2), são consideradas como áreas manejadas, portanto suas remoções de carbono pela vegetação nativa são de natureza antrópicas e devem ser contabilizadas nas emissões. Essas remoções ocorrem durante a fotossíntese, pela fixação de carbono (C) e liberação de oxigênio (O<sub>2</sub>) (IPCC, 2003). O cálculo das remoções de carbono por UCs e TIs está de acordo com a metodologia do IPCC, por se tratarem de florestas e campos

manejados (MCTI, 2020). Não foram incluídas outras fontes de remoções em florestas remanescentes em áreas privadas ou terras públicas fora de UCs e TIs.

Existem ressalvas com relação às estimativas de remoções realizadas por vegetação florestal nativa primária em áreas manejadas, com diversos trabalhos indicando uma redução do potencial de sequestro de carbono nessas florestas (Box 1). Nesse caso, é possível que o método calculado aqui, indicado pela metodologia do IPCC, superestime a captura de carbono e o papel das florestas manejadas para mitigar a perda de estoques de carbono por mudanças de uso da terra.

### **Box 1. Remoção de carbono por vegetação florestal primária em áreas protegidas**

A maior parte dos estudos sobre ciclo de energia e carbono no Brasil foi conduzida nas florestas tropicais da Amazônia. Resultados para esse bioma são variáveis, com estimativas de remoção de carbono com taxas de 10 a 14 tC.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> (Malhi et al., 2009, Nunes et al., 2012, Berenguer et al., 2018). No entanto, esses trabalhos não mencionam se as áreas de estudo têm algum indício de perturbação, e além disso, esses valores não são balanços a nível de ecossistema, e sim medidas de indivíduos arbóreos. No caso de trabalhos que mencionam o saldo final a nível de comunidade e ecossistema e descrevem as áreas de estudo em termos de uma vegetação madura ou perturbada, alguns mencionam balanços nulos até taxas muito baixas, entre 0,2 tC.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> e 0,43 tC.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, em áreas consideradas maduras (Baker et al., 2004, Vieira et al., 2004, Nogueira et al., 2008, Pyle et al., 2008). O valor final considerado pelo Terceiro Inventário (MCTI, 2016) para a Amazônia é de 0,43 tC.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>. Já no Quarto Inventário (MCTI, 2020) o estoque apresentado é de 0,48 tC.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>.

Em outros biomas, como o Cerrado e a Mata Atlântica, existem escassos trabalhos sobre incremento anual da biomassa (por exemplo, Rocha et al., 2002 e Miranda 2012, no Cerrado; Scaranello 2010, na Mata Atlântica). O Terceiro Inventário utilizou esses trabalhos para a estimativa de remoções de carbono em vegetação florestal primária e associa esses valores a outros biomas vizinhos onde não há informação específica (0,2 tC.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> no Cerrado e no Pantanal; 0,1 tC.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> na Caatinga; e 0,32 tC.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> na Mata Atlântica e no Pampa). No Quarto inventário as mesmas estimativas seguem a ordem: Cerrado e Pantanal (0,2 tC.ha-

1.ano-1), 0,1 tC.ha-1.ano-1 na Caatinga; e 0,44 tC.ha-1.ano-1 na Mata Atlântica e no Pampa).

Além das baixas taxas de remoção de carbono em florestas primárias, o papel dessas florestas como sequestradoras de carbono pode ainda estar sendo diminuído, por conta do aumento da estação seca com as mudanças climáticas (Brienen et al., 2015, Brando et al., 2019). Outra causa possível para essa diminuição das taxas de sequestro de carbono por florestas maduras é a degradação inconspícua dessas florestas pela proliferação da fragmentação no bioma Amazônia, que produz ambientes de borda e aumenta a incidência de incêndios florestais (Silva Junior et al., 2020). Em condições mais secas, que caracteriza os ambientes de borda, com maior incidência do fogo e afetados pelas mudanças no clima, é observado um aumento na mortalidade das árvores, o que pode afetar o balanço de carbono a nível ecossistêmico nessas florestas, e florestas que naturalmente eram sequestradoras de carbono podem até estar se tornando fontes de emissão (Brienen et al., 2015, Brando et al., 2019, Gatti et al 2021, Heinrich et al 2023, Lapola et al 2023).

Os padrões resultantes dos cálculos do SEEG, de um incremento significativo nas remoções em Áreas Protegidas (ver Resultados), não se dá portanto por uma alta taxa de incremento em vegetação primária nessas áreas, e sim pelo artefato do método de consideração de remoções em Florestas e Campos Manejados (FM e GM, respectivamente), proposta pelo IPCC (2006). À medida que se aumenta o número de Unidades de Conservação e Terras Indígenas, mais área é incluída como FM ou GM. Fazemos então essa ressalva e indicamos que os padrões e resultados dessa categoria de remoções devem, portanto, ser vistos e interpretados com precaução.

ii. **Em vegetação secundária.** São contabilizadas as remoções em áreas de vegetação secundária (florestas e campos secundários), conforme o Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020). Nessa categoria, não são distinguidas as remoções por crescimento de vegetação secundária em regeneração natural ou por restauração ativa.

iii. **Alterações de uso da terra.** Pode haver sequestro de CO<sub>2</sub> da atmosfera no caso de conversão para um tipo de uso com maior estoque de carbono por hectare (uma pastagem convertida em floresta plantada, por exemplo). Nessa categoria, são contabilizadas essas

mudanças de uso que acarretam em incremento de carbono em relação a cobertura e uso da terra anterior.

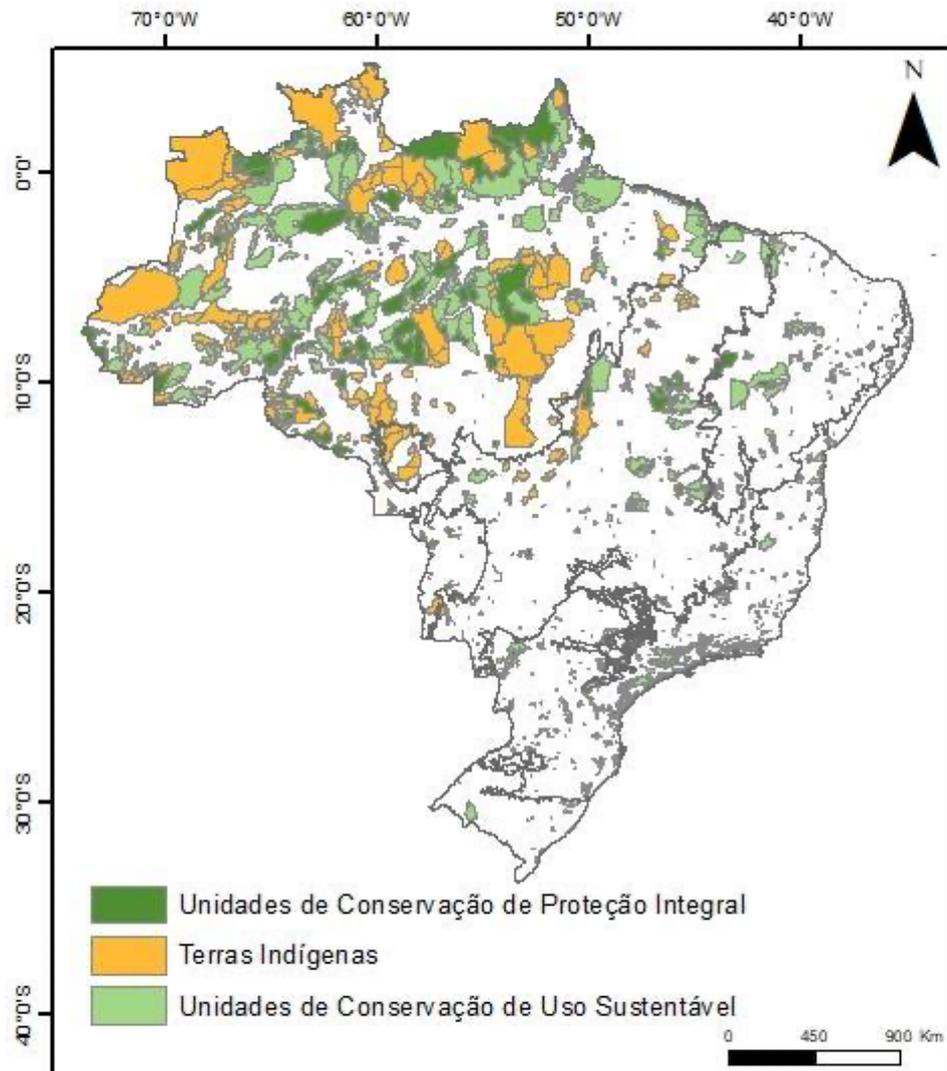


Figura 2. Áreas Protegidas (Terras Indígenas e Unidades de Conservação) no Brasil utilizadas para calcular as remoções em florestas e campos manejados, compiladas e atualizadas com base nas bases do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade e Fundação Nacional dos Povos Indígenas (2023).

## 2. Método de cálculo

### Equações de cálculo - IPCC

O Guia de Boas Práticas do IPCC (2003), e adotado pelo Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020), calcula as emissões por mudança do uso da terra usando duas abordagens, dependendo do tipo de transição de uso. No “método de incrementos e perdas” são considerados valores médios de mudança de estoques de carbono por unidade de área da transição e unidade de tempo:

$$\Delta C = \sum_{ijk} A_{ijk} \times (C_i)_{ijk}$$

Onde:

$\Delta C$  : Mudanças no estoque de carbono, em toneladas por hectare.

$C_i$  : Taxa de incremento, em toneladas por hectare/ano.

$A$  : Área de terra, em hectares.

$ijk$  : Índices que correspondem ao tipo de clima (i), tipo de vegetação (j), e prática de manejo (k).

No “método das duas medições de estoque”, as emissões são calculadas considerando os valores dos estoques médios de carbono no início e no final do período do inventário, e são dadas por:

$$\Delta C = \sum_{ijk} \frac{(C_{t2} - C_{t1})}{(t2 - t1)}$$

Onde:

$\Delta C$  : Mudanças no estoque de carbono em toneladas por hectare.

$C_{t2}, C_{t1}$  : Estoques de carbono do reservatório no início e final do período considerado.

$t2, t1$  : Ano de início e fim do período considerado.

As equações presentes no Quarto Inventário Nacional levam em consideração o tempo do período considerado (no caso do Inventário, 1994-2002, 2002-2010 e 2010-2016 para a maioria dos biomas e um período adicional de 2002-2005 para a Amazônia) para algumas

transições. Por exemplo, uma floresta manejada tem seu incremento anual calculado ao longo de todos os anos ( $T$ ) do período; e a recuperação de uma vegetação secundária é assumida como tendo início na metade do período ( $T/2$ ). No presente método, esses parâmetros de tempo foram excluídos das equações das duas medições de estoque, pois calculamos a transição pontualmente no tempo, de um ano para outro.

As remoções por florestas e campos manejados (Unidades de Conservação e Terras Indígenas, Figura 2), bem como por vegetações secundárias são calculadas usando a equação do “método de incrementos e perdas”. Já os demais tipos de transição, utilizam o “método das duas medições de estoque” ou uma combinação entre eles. A combinação entre os dois tipos de equação se dá no caso de um tipo de classe que tem incremento gradual após a transição (por exemplo, agricultura, floresta plantada, ou o primeiro ano de uma regeneração de vegetação nativa). Os tipos de transição contabilizados e a equação aplicada a cada um (incrementos e perdas, duas medições de estoque ou a combinação entre elas) estão apresentados no Anexo 2.

## SEEG 12: Abordagem para calcular as emissões

A partir da versão beta do SEEG 6, o método para estimar as emissões e as remoções associadas às mudanças de uso da terra utiliza os dados das transições anuais de uso da terra observadas no projeto MapBiomas. Nesta abordagem, os mapas anuais de cobertura de uso da terra passam por passos de estabilização e filtragem para consolidar as transições principais que ocorrem a cada ano, para depois aplicar os cálculos baseados em estoques e incrementos apresentados no Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020). No SEEG 12, a Coleção 9 do MapBiomas foi utilizada, que cobre o período de 1985-2023, e resulta em um período para o SEEG de 1990-2023. A exclusão dos primeiros anos se dá por uma maior incerteza na classificação da cobertura e uso da terra pelo MapBiomas no início da série histórica. Além disso, o início da série em 1990 se assemelha ao início do primeiro período coberto pela Quarta Comunicação Nacional (MCTI, 2020).

O passo-a-passo geral para o cálculo das estimativas de emissões e remoções por transições de uso da terra e tratamento dos mapas anuais de cobertura e uso da terra do MapBiomas são listados abaixo. Os quatro primeiros passos, referentes ao trabalho espacial, foram feitos na plataforma Google Earth Engine, e o último passo, referente à aplicação das equações de cálculo de emissão e remoção por área de transição, foi feito no programa R.

- 1) Obtenção das máscaras de desmatamento e regeneração a partir do produto de desmatamento e vegetação secundária do MapBiomas coleção

9, com um filtro espacial para descartar transições muito pequenas e isoladas.

- 2) Estabilização dos mapas de cobertura, para considerar transições de uso consolidadas, com base na frequência das classes ao longo da série temporal.
- 3) Criação de mapas de transição, que combinam as classes antes e depois da transição para cada par de anos.
- 4) Cálculo zonal para a extração da área total de cada transição por região de interesse: estados, biomas e áreas protegidas.
- 5) Aplicação das equações de emissão e remoção de dióxido de carbono sobre a área das transições, com base nos estoques e incrementos apresentados na Quarta Comunicação Nacional (MCTIC, 2020).
- 6) Cálculo das emissões por queima de resíduos florestais.
- 7) Cálculo das emissões por alteração no estoque de carbono orgânico do solo.
- 8) Organização e ajustes finais nos resultados, incluindo a correção dos anos finais da série com base nos dados *proxy* de desmatamento.

Cada um desses passos é detalhado nas seções a seguir.

## Máscaras de desmatamento e regeneração

O primeiro passo para os cálculos do SEEG MUT é obter máscaras de desmatamento e regeneração anuais que incluem apenas as transições consistentes com estes processos. Dessa forma, transições espúrias, resultantes de erros de classificação, são minimizadas.

Pela primeira vez, o SEEG considera como suas máscaras de desmatamento e regeneração o dado do módulo de desmatamento e vegetação secundária do MapBiomas coleção 9. Esse dado gera a informação de perda e ganho anual de vegetação nativa, construindo uma série temporal com base em filtros temporais e espaciais. A metodologia de geração desses dados pode ser visualizada [aqui](#). Para construir o dado utilizado no SEEG, consideramos as classes 'Supressão de Vegetação Primária' (classe 4) e 'Supressão de Vegetação Secundária' (classe 6) como a máscara de desmatamento e a classe 'Recuperação para Vegetação Secundária' (classe 5) como a máscara de

regeneração. Adicionalmente, os mapas anuais de perda e ganho de vegetação nativa passaram por um filtro espacial, com um kernel de 5 pixels, para exclusão de transições muito pequenas e isoladas.

## Estabilização das coberturas anuais

O próximo passo para geração das transições consistentes para os cálculos do SEEG foi a obtenção das coberturas anuais estáveis em todo o período e a estabilização das mudanças de uso da terra observadas dentro das máscaras de perda e ganho de vegetação nativa.

O passo-a-passo para estabilização das coberturas anuais, aplicado a todos os anos do período, está resumido na Figura 3 e é o seguinte:

- 1) A nível de pixel, gera-se a frequência de cada classe em todo o período da coleção.
- 2) Gera-se uma camada de vegetação nativa estável, onde somente os pixels que foram vegetação nativa (ou água) durante 95% do período são mantidos, e a classe mais frequente é alocada.
- 3) Gera-se uma camada de uso antrópico estável, onde somente os pixels que foram classe de uso durante 100% do período (39 anos) são mantidos, e a classe mais frequente é alocada.
- 4) Fora dessas duas coberturas estabilizadas (vegetação nativa e uso antrópico), as áreas passíveis de mudança são alocadas com as classes originais de cada ano apenas nas áreas das máscaras de desmatamento e regeneração geradas no passo anterior.
- 5) Dentro das áreas passíveis de mudança (áreas dentro das máscaras), a classe de maior frequência antes e depois da mudança são alocadas.
- 6) Nas áreas de regeneração, as classes nativas são multiplicadas por 100 para indicar vegetação secundária.
- 7) Pixels vazios após este procedimento são indicativos de trajetória de classificação com alto grau de incerteza e são desconsiderados.

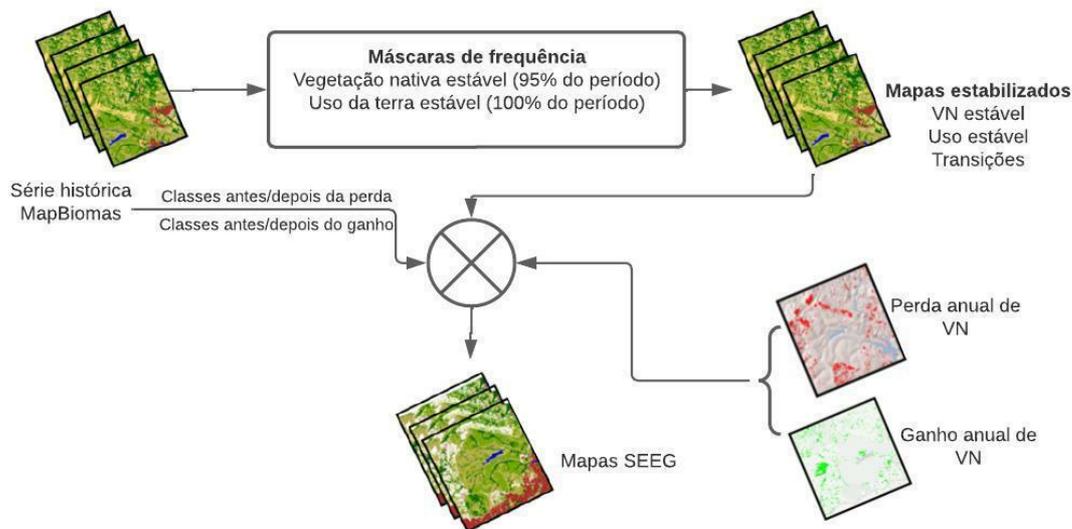


Figura 3. Passos envolvidos na geração das coberturas ano a ano a partir da Coleção 8 do MapBiomas, que foram utilizados para estimativas de emissão e remoção por mudanças de uso da terra no SEEG 11, setor MUT.

### Geração das transições ano a ano

A partir das coberturas estabilizadas, as transições ano a ano foram geradas pela aplicação da seguinte aritmética por pixel:

$$\text{Transição} = t1 * 10000 + t2$$

Dessa forma, foram gerados mapas de transição de 1990-1991 a 2021-2022, em que a informação das classes no primeiro ano (t1) e no segundo ano (t2) foram mantidas em um único código. O valor de 10000 foi necessário para acomodar os maiores valores de classe nativa secundária. Por exemplo, vegetação campestre secundária (classe 12000) constante na transição:

$$\text{Transição} = 12000 * 10000 + 12000 = 120012000$$

## Cálculo zonal das emissões e remoções

O objetivo do SEEG 12 no setor MUT é obter estimativas de emissões e remoções associadas às mudanças no uso da terra que sejam relacionáveis aos biomas e estados, e que estejam associadas às coberturas dentro e fora de áreas protegidas (Unidades de Conservação e Terras indígenas do ICMBio e da FUNAI), conforme descrito anteriormente.

As áreas de cada transição par a par foram então calculadas por níveis “zonais”, representados por dois rasters: um em que o valor do pixel é o código dos biomas e estados (geocódigo do IBGE de três algarismos, em que o primeiro algarismo define o bioma e os dois seguintes definem o estado); e outro cujo valor do pixel indica dentro (1) e fora (0) de áreas protegidas.

## Correspondência entre classes de vegetação

Para a aplicação dos valores de estoque e incremento de carbono de cada classe, foi necessário criar a correspondência das diferentes classes consideradas no Quarto Inventário com as classes presentes nos mapas de cobertura e uso da terra do MapBiomas. Essa correspondência e os valores finais de estoque e incremento anual relativo às classes do MapBiomas estão descritos nos itens abaixo.

Primeiramente, foi necessário fazer a correspondência das classes de uso e cobertura da terra da Coleção 9 do MapBiomas com as classes utilizadas no Quarto Inventário e consideradas pelo IPCC (2006). São essas classes que definem e organizam o tipo de transição a ser contabilizada, de forma compatível entre os métodos. Essas classes incluem:

- FM (floresta manejada): classes Formação Florestal (3), Formação Savânica (4), Mangue (5), Restinga arborizada (49) e Restinga arbustiva (50).
- FNM (floresta não manejada): classes Formação Florestal (3), Formação Savânica (4), Mangue (5), Restinga arborizada (49) e Restinga arbustiva (50).
- GM (campo manejado): classes Campo Alagado e Área Pantanosa (11) e Formação Campestre (12).
- GNM (campo não manejado): classes Campo Alagado e Área Pantanosa (11) e Formação Campestre (12).
- FSec (floresta secundária): classes Formação Florestal (300), Formação Savânica (400), Mangue (500) e Restinga arborizada (4900).

- GSec (campo secundário): classes Campo Alagado e Área Pantanosa (1100) e Formação Campestre (1200).
- Ac (áreas agrícolas): classes de Floresta plantada (9), Lavouras temporária: como Cana-de-açúcar (20), Soja (39), Arroz (40), Algodão (62) e Outras lavouras temporárias (41), e Lavoura Perene: como Dendê (35), Café (46), Citrus (47) e Outras lavouras perenes (48) e Mosaico de Agricultura e Pastagem (21).
- Ap (Pastagem): 15.
- O (outras classes): classes Praia, Duna e Areal (23), Infraestrutura Urbana (24), Outras Áreas não Vegetadas (25), Afloramento Rochoso (29), Mineração (30) e Aquicultura (31).

## Estoque e incremento em vegetação nativa primária

Os valores de estoque de carbono na vegetação nativa presentes no Quarto Inventário são relativos ao estoque total (somando os compartimentos de estoque acima do solo, abaixo do solo, de serrapilheira e madeira morta) estimados para cada classe da legenda do mapa de fitofisionomias do IBGE (IBGE, 2012). Para compatibilizar as classes de vegetação nativa do IBGE e as classes do MapBiomas, foi necessário agrupar os tipos de vegetação de acordo com sua classificação, onde presente, em Formação Florestal (classe 3), Formação Savânica (classe 4), Mangue (classe 5), Restinga arborizada (49), Campo Alagado e Área Pantanosa (classe 11) e Formação Campestre (classe 12). Esse agrupamento se deu baseado em uma consulta com especialistas de cada bioma. No caso do Cerrado, especificamente, os estoques no Quarto Inventário são referentes ao estado, e portanto esse cálculo de estoque também foi regionalizado por estado. O valor de estoque de carbono final para cada uma dessas grandes classes do MapBiomas foi, portanto, calculado como a média ponderada dos estoques de cada tipo de vegetação do IBGE de acordo com sua proporção no bioma (disponível no Relatório de Referência do Quarto Inventário, MCTI, 2020). A correspondência das classes e os valores de estoque originais, as proporções das classes por bioma e os valores finais de estoque considerados no presente método estão apresentados no Tabela 2, exceto para os valores finais de estoque de Floresta no bioma Cerrado, que são específicos por estado (Tabela 3).

Tabela 2. Agrupamento das classes de vegetação nativa conforme a legenda do mapa de fitofisionomias do IBGE para correspondência com as classes de vegetação nativa do MapBiomas Coleção 7.0 e seus estoques de carbono finais associados, de acordo com as grandes classes, onde presente: Formação Florestal (3), Formação Savânica (4), Mangue (5), Restinga arborizada (49), Campo Alagado e Área Pantanosa (11), Formação Campestre (12). Os valores finais de Floresta para o bioma Cerrado foram calculados por estado e estão apresentados em outra tabela.

Bioma	Classe IBGE	Classe MapBiomas	Fitofisionomia (IBGE)	Proporção no bioma (%)	Estoque segundo o 4º Inventário (tC/ha)	Estoque segundo o SEEG (tC/ha)
<b>Amazônia</b>	Aa	3	Floresta Ombrófila Aberta Aluvial	2.3	145.3	164.71
	Ab	3	Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas	9.75	165.9	
	Am	3	Floresta Ombrófila Aberta Montana	0.0002	39.2	
	As	3	Floresta Ombrófila Aberta Submontana	14.35	132	
	Ca	3	Floresta Estacional Decidual Aluvial	0.004	107.7	
	Cb	3	Floresta Estacional Decidual Terras Baixas	0.02	59.1	
	Cs	3	Floresta Estacional Decidual Submontana	0.19	129.8	
	Da	3	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	4.84	130.7	
	Db	3	Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas	22.77	185.3	
	Dm	3	Floresta Ombrófila Densa Montana	0.93	138.7	
	Ds	3	Floresta Ombrófila Densa Submontana	23.67	201.1	
	Fa	3	Floresta Estacional Semidecidual aluvial	0.18	65.6	

Fb	3	Floresta Estacional Semidecidual de terras baixas	0.5	81.7
Fm	3	Floresta Estacional Semidecidual montana	0.02	125.8
Fs	3	Floresta Estacional Semidecidual Submontana	4.53	88.9
L	3	Campinarana	0.001	170.4
La	3	Campinarana Arborizada	0.58	302.7
Ld	3	Campinarana Florestada	3.07	131.6
LO	3	Contato Campinarana/Floresta Ombrófila	0.42	130
ON	3	Contato Floresta Ombrófila/Floresta Estacional	0.85	58.4
P	3	Formações Pioneiras	0.0003	66.6
SN	3	Contato Savana/Floresta Estacional	0.43	57.6
SO	3	Contato Savana/Floresta Ombrófila	0.39	131.2
SP	3	Contato Savana/Formações Pioneiras	0.001	71.2
Td	3	Savana Estépica Florestada	0.12	25.2
TN	3	Contato Savana-Estépica/Floresta Estacional	0.01	51.6
Sd	3	Savana Florestada	1.51	150
Pm	3	Pioneiras com influência Marinha (restinga)	0.001	34.8

ST	4	Contato Savana/Savana-Estépica	0.07	49.7	165.49	
Ta	4	Savana Estépica Arborizada	0.00007	128.9		
S	4	Savana	0.01	139.5		
Sa	4	Savana Arborizada	1.1	173.1		
Pf	5	Pioneiras com influência fluviomarinha	0.44	38.3	38.3	
Pa	11	Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre	1.67	58.2	58.2	
Lg	12	Campinarana gramíneo lenhosa	0.41	121	110.34	
Rm	12	Refúgio montano	0.09	90.2		
Sg	12	Savana Gramíneo-Lenhosa	0.4	49.8		
Tg	12	Savana Estépica Gramíneo Lenhosa	0.02	17.5		
T	12	Savana-Estépica	0.000004	193.4		
Lb	12	Campinarana Arbustiva	0.3	189.3		
Sp	12	Savana Parque	1.5	114		
Tp	12	Savana Estépica Parque	0.07	26.5		
RI	12	Refúgio altomontano	0.001	282.1		
Rs	12	Refúgio submontano	0.0004	185.1		
<b>Cerrado</b>	Aa	3	Floresta Ombrófila Aberta Aluvial	0.05	145.3	valor por estado
	Ab	3	Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	0.05	165.89	
	As	3	Floresta Ombrófila Aberta Submontana	0.21	88.08	

Ca	3	Floresta Estacional Decidual Aluvial	0.06	121.46
Cb	3	Floresta Estacional Decidual das Terras Baixas	0.09	104.87
Cm	3	Floresta Estacional Decidual Montana	1.55	89.74
Cs	3	Floresta Estacional Decidual Submontana	4.04	98,275
Da	3	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	0.04	130.71
Ds	3	Floresta Ombrófila Densa Submontana	0.06	118.41
Fa	3	Floresta Estacional Semidecidual Aluvial	2.03	97
Fb	3	Floresta Estacional Semidecidual das Terras Baixas	0.05	89
Fm	3	Floresta Estacional Semidecidual Montana	1.36	75
Fs	3	Floresta Estacional Semidecidual Submontana	2.9	69
MI	3	Floresta Ombrófila Mista Alto-montana	0.01	104.12
Mm	3	Floresta Ombrófila Mista Montana	0.03	80.12
ON	3	Contato Floresta Ombrófila/Floresta Estacional	0.12	102.18
Sd	3	Savana Florestada	8.53	68.49
SM	3	Contato Savana/Floresta Ombrófila Mista	0.1	67.57
SN	3	Contato Savana/Floresta Estacional	5.64	68.5

SO	3	Contato Savana/Floresta Ombrófila	0.03	66.33	
STN	3	Contato Savana/Savana Estépica/Floresta Estacional	0.15	47.57	
Td	3	Savana Estépica Florestada	0.14	43.33	
TN	3	Contato Savana Estépica/Floresta Estacional	0.79	45.83	
S	4	Savana	1.28	51.63	41.32
Sa	4	Savana Arborizada	48.69	41.31	
ST	4	Contato Savana/Savana-Estépica	0.24	36.11	
Ta	4	Savana Estépica Arborizada	0.49	17.9	
Pf	5	Formação Pioneira com influência fluvio-marinha	0.06	38.26	38.26
Pa	11	Formação Pioneira com influência fluvial e/ou lacustre	0.35	36.21	36.21
Eg	12	Estepe Gramíneo Lenhosa	0.01	5.13	24.94
Sg	12	Savana Gramíneo-lenhosa	4.97	18.49	
Tg	12	Savana Estépica Gramíneo-lenhosa	0.02	17.49	
Rm	12	Refúgio Montano	0.09	18.55	
Sp	12	Savana Parque	15.58	26.79	
Tp	12	Savana Estépica Parque	0.16	26.51	
Pm	49	Pioneiras com influência Marinha (restinga)	0.03	34.76	34.76

**Caatinga**

Aa	3	Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	0.004	57.33	68.53
Ab	3	Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas	0.0002	57.33	
Am	3	Floresta Ombrófila Aberta Montana	0.01	57.33	
As	3	Floresta Ombrófila Aberta Submontana	0.33	127.3	
Ca	3	Floresta Estacional Decidual Aluvial	0.008	121.72	
Cb	3	Floresta Estacional Decidual Terras Baixas	0.002	75.3	
Cm	3	Floresta Estacional Decidual Montana	1.03	51.84	
Cs	3	Floresta Estacional Decidual Submontana	1.79	69.05	
Da	3	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	0.02	185.7	
Dm	3	Floresta Ombrófila Densa Montana	0.07	185.7	
Ds	3	Floresta Ombrófila Densa Submontana	0.04	185.7	
Fa	3	Floresta Estacional Semidecidual aluvial	0.32	92.94	
Fb	3	Floresta Estacional Semidecidual de terras baixas	0.04	106.01	
Fm	3	Floresta Estacional Semidecidual Montana	0.82	98.89	
Fs	3	Floresta Estacional Semidecidual Submontana	2.24	137.89	
Sd	3	Savana Florestada	0.06	65.79	
SN	3	Contato Savana/Floresta Estacional	0.99	69.66	

Td	3	Savana Estépica Florestada	6.89	43.34		
TN	3	Contato Savana Estépica/Floresta Estacional	8.17	64.16		
ST	4	Contato Savana/Savana-Estépica	3.97	26.47	20.3	
Ta	4	Savana Estépica Arborizada	59.67	18.28		
Sa	4	Savana Arborizada	4.57	41.31		
Pf	5	Pioneiras com influência fluviomarinha	0.27	170.54	170.54	
Sg	12	Savana Gramíneo-Lenhosa	0.29	19.74	15.46	
Tg	12	Savana Estépica Gramíneo Lenhosa	0.26	4.98		
Tp	12	Savana Estépica Parque	5.59	10.87		
Pa	12	Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre	0.34	81.89		
Rm	12	Refúgio Montano	0.64	17.55		
Sp	12	Savana Parque	0.92	18.92		
Pm	49	Pioneiras com influência Marinha (restinga)	0.55	147.09	147.09	
<b>Mata Atlântica</b>	Aa	3	Floresta Ombrófila Aberta Aluvial	0.07	47.09	121.78
	Ab	3	Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas	0.22	47.09	
	Am	3	Floresta Ombrófila Aberta Montana	0.01	46.91	
	As	3	Floresta Ombrófila Aberta Submontana	0.51	49.42	

Ca	3	Floresta Estacional Decidual Aluvial	0.14	121.8
Cb	3	Floresta Estacional Decidual Terras Baixas	0.01	68.24
Cm	3	Floresta Estacional Decidual Montana	2.86	75.83
Cs	3	Floresta Estacional Decidual Submontana	3.22	106.5
Da	3	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	0.32	173.9
Db	3	Floresta Ombrófila de terras baixas	2.32	112.97
DI	3	Floresta Ombrófila Densa Alto-montana	0.16	85.9
Dm	3	Floresta Ombrófila Densa Montana	5.85	182.88
Ds	3	Floresta Ombrófila Densa Submontana	8.34	180.65
EM	3	Contato Estepe/ Floresta Ombrófila Mista	1.18	64.7
EN	3	Contato Estepe/Floresta Estacional	0.57	68.34
Fa	3	Floresta Estacional Semidecidual aluvial	1.59	78.17
Fb	3	Floresta Estacional Semidecidual de terras baixas	1.07	83.9
Fm	3	Floresta Estacional Semidecidual Montana	13.17	99.49
Fs	3	Floresta Estacional Semidecidual Submontana	21.68	125.79
Ma	3	Floresta Ombrófila Mista Aluvial	0.11	85.41
MI	3	Floresta Ombrófila Mista Alto-montana	1.83	104.1

Mm	3	Floresta Ombrófila Mista Montana	12.56	142.15	
Ms	3	Floresta Ombrófila Mista Submontana	0.08	142.7	
NM	3	Contato Floresta Estacional/Floresta Ombrófila Mista	1.71	76.01	
OM	3	Contato Floresta Ombrófila/Floresta Ombrófila Mista	0.75	83.67	
ON	3	Contato Floresta Ombrófila/Floresta Estacional	0.98	78.84	
OP	3	Contato Floresta Ombrófila/Formações Pioneiras	0.05	84.15	
P	3	Formação Pioneira	0.15	104.53	
SM	3	Contato Savana/Floresta Ombrófila Mista	0.32	67.59	
SN	3	Contato Savana/Floresta Estacional	3.68	68.5	
SO	3	Contato Savana/Floresta Ombrófila	0.14	66.33	
TN	3	Contato Savana Estépica/Floresta Estacional	0.63	73.24	
E	4	Estepe	0.4	1.04	47.65
Sd	4	Savana Florestada	1.08	103.2	
ST	4	Contato Savana/Savana-Estépica	0.05	36.11	
Ta	4	Savana Estépica Arborizada	0.87	13.23	
Td	4	Savana Estépica Florestada	0.01	30.81	

S	4	Savana	0.27	51.63	
Sa	4	Savana Arborizada	1.85	41.31	
Pf	5	Pioneiras com influência fluviomarinha	0.31	83.06	83.06
Pa	11	Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre	1.37	103.75	103.75
Eg	12	Estepe Gramíneo Lenhosa	3.99	8.99	13.91
Lg	12	Campinarana gramíneo lenhosa	0.07	1.47	
Sg	12	Savana Gramíneo-Lenhosa	1.39	18.49	
RI	12	Refúgio Alto-montano	0.12	9	
Rm	12	Refúgio Montano	0.03	11.55	
Sp	12	Savana Parque	1.15	26.79	
Pm	49	Pioneiras com influência Marinha (restinga)	0.68	104.7	104.7

## Pampa

Ca	3	Floresta Estacional Decidual Aluvial	0.84	136.17	76.03
Cm	3	Floresta Estacional Decidual Montana	0.006	167.29	
Cb	3	Floresta Estacional Decidual Terras Baixas	0.33	69.8	
Cs	3	Floresta Estacional Decidual Submontana	3.93	167.16	
Dm	3	Floresta Ombrófila Densa Montana	0.0002	159.41	
Ds	3	Floresta Ombrófila Densa Submontana	0.03	174.38	
Da	3	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	0.0003	85.91	

Db	3	Floresta Ombrófila de terras baixas	0.004	112.98	
EN	3	Contato Estepe/ Floresta Estacional	4.98	5.13	
EM	3	Contato Estepe/ Floresta Ombrófila Mista	0.14	9.4	
EP	3	Contato Estepe/Formações Pioneiras	3.11	55.51	
Fa	3	Floresta Estacional Semidecidual Aluvial	0.1	79.92	
Fb	3	Floresta Estacional Semidecidual das Terras Baixas	0.43	86.05	
Fm	3	Floresta Estacional Semidecidual Montana	0.08	106.76	
Fs	3	Floresta Estacional Semidecidual Submontana	4.56	109.29	
Ma	3	Floresta Ombrófila Mista Aluvial	0.0008	85.42	
Ms	3	Floresta Ombrófila Mista Submontana	0.006	130.71	
NM	3	Contato Floresta Estacional/Floresta Ombrófila Mista	0.03	167.16	
NP	3	Contato Floresta Estacional/Formações Pioneiras	2.2	12.77	
OM	3	Contato Floresta Ombrófila/Floresta Ombrófila Mista	0.002	167.16	
OP	3	Contato Floresta Ombrófila/Formações Pioneiras	0.12	12.77	
T	3	Savana Estépica	0.006	167.16	
P	11	Formação pioneira	2.87	9.4	11.74

Pf	11	Pioneiras com influência fluviomarinha	0.01	12.77	
Pa	11	Vegetação com Influência Fluvial e/ou Lacustre	5.75	12.77	
Pm	11	Pioneiras com influência Marinha (restinga)	0.8	12.77	
Eg	12	Estepe Gramíneo Lenhosa	26.78	5.13	21.84
Ep	12	Estepe parque	3.96	167.16	
Tg	12	Savana Estépica Gramíneo-lenhosa	0.89	9.4	
E	12	Estepe	21.65	9.4	
Ea	12	Estepe Arborizada	6.27	55.51	
Pa	12	Vegetação com Influência Fluvial e/ou Lacustre	5.75	12.77	
Tp	12	Savana Estépica Parque	0.11	26.51	
Pm	12	Pioneiras com influência Marinha (restinga)	0.8	12.77	

## Pantanal

Ca	3	Floresta Estacional Decidual Aluvial	0.003	121.72	118.77
Cb	3	Floresta Estacional Decidual das Terras Baixas	1.8	104.87	
Cs	3	Floresta Estacional Decidual Submontana	0.8	127.54	
Fa	3	Floresta Estacional Semidecidual Aluvial	6.06	167.46	
Fb	3	Floresta Estacional Semidecidual das terras baixas	1.6	81.73	
Fs	3	Floresta Estacional Semidecidual Submontana	0.02	83.48	

Sd	3	Savana Florestada	10.62	103.21	
Td	3	Savana Estépica Florestada	2.43	99.09	
SN	3	Contato Savana/Floresta Estacional	0.09	41.31	
TN	3	Contato Savana Estépica/Floresta Estacional	0.06	167.46	
Ta	4	Savana Estépica Arborizada	2.89	11.96	39.84
ST	4	Contato Savana/Savana-Estépica	1.11	81.56	
T	4	Savana Estépica	0.003	167.16	
Sa	4	Savana Arborizada	19.55	41.31	
S	4	Savana	0.08	103.21	
Tg	11	Savana Estépica Gramíneo Lenhosa	6.03	17.49	23.24
Sp	11	Savana Parque	26.66	26.79	
Tp	11	Savana Estépica Parque	3.36	26.51	
Sg	12	Savana Gramíneo Lenhosa	14.93	18.49	25.21
Tg	12	Savana Estépica Gramíneo Lenhosa	6.03	17.49	
Sp	12	Savana Parque	26.66	26.79	
Tp	12	Savana Estépica Parque	3.36	26.51	

Tabela 3. Estoques finais da classe Floresta (classe 3) do MapBiomias para o bioma Cerrado, calculado pela média ponderada de todas as fisionomias florestais do bioma de acordo com sua proporção em área no bioma, mas considerando valores específicos por estado naquelas classes onde houve diferenciação por estado pelo Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020).

<b>Estado</b>	<b>Estoque (tC/ha)</b>
AC	76,30
AL	76,30
AM	76,30
AP	76,30
BA	62,52
CE	76,30
DF	71,42
ES	76,30
GO	64,72
MA	62,69
MG	64,73
MS	99,19
MT	97,46
PA	74,04
PB	76,30
PE	76,30
PI	61,74
PR	74,80
RJ	76,30
RN	76,30
RO	76,30
RR	76,30
RS	76,30
SC	76,30
SE	76,30
SP	80,45
TO	67,35

Para cálculo das remoções em floresta manejada (dentro de áreas protegidas), é necessário aplicar estimativas de incremento em vegetação primária. Os valores utilizados foram os mesmos aplicados no Quarto Inventário, e independem da classe de vegetação do IBGE. Eles se resumem em: a) Floresta, Savana, Mangue e Restinga Arborizada (classes 3, 4, 5 e 49): 0,48 tC/ha/ano na Amazônia (com a exceção da classe 4 e 5, em que decidimos associar os valores do Cerrado), 0,20 tC/ha/ano no Cerrado, 0,10 tC/ha/ano na Caatinga, 0,32 tC/ha/ano no Pampa e na Mata Atlântica, e 0,2 tC/ha/ano no Pantanal; b) Campo (classe 11 e 12, onde presente): 0,44 tC/ha/ano para todos os biomas, exceto na Caatinga com um incremento de 0,52 tC/ha/ano.

Outras áreas naturais sem vegetação (classes 23: praia e duna; 29: afloramento rochoso e 32: apicum) têm incremento e estoques de carbono nulos.

### Estoque e incremento em vegetação nativa secundária

Os estoques de floresta secundária remanescente foram definidos como 44% do estoque de vegetação original em todos os biomas (MCTI, 2020). Os incrementos anuais (tC/ha/ano) de vegetação secundária também foram aplicados com base nos mesmos presentes no Quarto Inventário. No caso de vegetação florestal secundária, os incrementos variaram por bioma e histórico de uso (Tabela 4), por exemplo, Floresta secundária crescendo onde era Pasto (FSec-Ap), onde era Agricultura (Fsec-Ac), e onde era Outros tipos de Uso (Fsec-O). A partir do segundo ano de recuperação da vegetação, os incrementos aplicados são referentes ao “histórico de floresta” (FSec-F). Para vegetação campestre secundária, os fatores variaram por bioma, mas não de acordo com o histórico de uso, e são: 1,7 tC/ha/ano para Amazônia, Cerrado, Pampa e Pantanal; 0,66 tC/ha/ano na Caatinga e na Mata Atlântica.

Tabela 4. Incremento em vegetação florestal secundária por bioma e histórico de uso (Pastagem, Agricultura, Outros tipos de uso e Floresta), segundo o Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020).

Biomassas	Incremento (tC/ha/ano)			
	FSec-Ap	FSec-Ac	Fsec-O	FSec-F
Amazônia	3,03	5,22	0,62	4,97
Caatinga	0,64	0,66	0,59	1,72
Cerrado	2,85	4,73	0,59	1,03
Mata Atlântica	1,66	1,66	1,66	1,66
Pampa	2,85	4,73	0,59	1,76
Pantanal	2,85	4,73	0,59	2,77

### Estoque e incremento em classes de uso antrópico

O Quarto Inventário traz valores de estoque em pastagem, referente à classe 15 no MapBiomassas, dependentes por bioma, e considera como nulo o incremento anual de áreas de pastagem em todos os biomas (Tabela 5).

Com relação às áreas de agricultura, o Quarto Inventário traz estimativas para culturas anuais, semi-perenes e perenes. Os valores de estoque em agricultura anual e semi-perenes (no MapBiomassas, classes 39: soja, 40: Arroz, 62: algodão, 41: demais cultivos anuais) são constantes para todos os biomas, e os de incremento são nulos (Tabela 5). Uma ressalva deve ser feita para a classe 21, referente ao Mosaico de Agricultura e Pastagem no MapBiomassas, onde não se diferencia se a área é de atividade agrícola ou de pecuária. Para essa classe consideraram-se os valores de estoque de agricultura anual para cada bioma (Tabela 5). No entanto, a classe 21 na Coleção 9 do MapBiomassas é restrita a pequenas áreas.

O Quarto Inventário traz informações sobre estoques e incrementos de carbono de áreas de cultivos perenes (classe 35: dendê, 46: café, 47: citrus e 48: outras lavouras perenes) também apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de estoque e incremento de carbono associados às classes de agropecuária por bioma, incluindo a informação da correspondência com as classes dos mapas de cobertura e uso da terra do MapBiomas Coleção 9.

Tipo de valor	Classes	Amazônia	Caatinga	Cerrado	M. Atlântica	Pampa	Pantanal
Estoque (tC/ha)	Pastagem (classe 15)	10,0	1,19	7,57	2,60	7,57	7,57
	Agricultura anual e semi-perene (classes 20, 39, 40, 41 e 62)	6,18	0,56	5,0	3,83	5,00	5,00
	Agricultura perene (classes 35, 46, 47 e 48)	11,37	24,80	21,00	23,52	21,00	21,00
	Mosaico de pastagem e agricultura (classe 21)	6,18	0,56	5,00	3,83	5,00	5,00
Incremento (tC/ha/ano)	Pastagem (classe 15)	-	-	-	-	-	-
	Agricultura anual e semi-perene (classes 20, 39, 40, 41 e 62)	-	-	-	-	-	-
	Agricultura perene (classes 35, 46, 47 e 48)	0,91	1,37	2,60	1,31	2,60	2,60
	Mosaico de pastagem e agricultura (classe 21)	-	-	-	-	-	-

A última classe referente ao uso antrópico a ser considerado nos cálculos das transições anuais é a classe de floresta plantada, ou silvicultura. Para essa classe, adotamos as estimativas simplificadas de estoque e incremento de carbono de Eucalipto e Pinus, de acordo com as respectivas proporções nos biomas e nos períodos adotados no Quarto Inventário. Isso nos levou a considerar um valor de estoque constante de 42,05 tC/ha e um valor de incremento de 10,36 tC/ha/ano.

Por fim, os estoques e incrementos de estoque de carbono referentes a todas as demais classes antrópicas do MapBiomas presentes nas transições contabilizadas (24: infraestrutura urbana; 25: outras áreas não vegetadas; 30: mineração; e 31: aquicultura) foram considerados nulos.

## Cálculo das emissões por queima de resíduos florestais

Primeiramente, para estimar a quantidade de biomassa queimada após o desmatamento, o presente método desconta a biomassa de lenha e madeira em tora retirada da área antes da queimada, seguindo a Quarta Comunicação e baseada no dado de extração de lenha e madeira em tora por estado segundo o IBGE (2024). Esse dado apresenta o volume de lenha e madeira em tora (metro cúbico estéreo) retirada por estado. Ele é primeiramente transformado em biomassa seca pela multiplicação de dois fatores, que geram os valores em metro cúbico sólido (0,6141) e de metro cúbico sólido para biomassa seca em toneladas (0,631).

Os dados de emissão por desmatamento são também transformados de dióxido de carbono para biomassa seca, para a retirada desse valor de lenha e madeira em tora, dividindo as emissões por 44/12 (CO<sub>2</sub> para C) e por 0.47 para obtenção da biomassa seca em toneladas.

Dessa forma, do total de biomassa seca retirada por desmatamento, a proporção que foi queimada e gerou metano e óxido nitroso por estado é obtida. Finalmente, para transformar essa quantidade de biomassa seca queimada em emissões, a biomassa é multiplicada pelos fatores de combustão por tipo de vegetação (florestal [F] e não florestal [média de G e OFL]) e por bioma, apresentados na Tabela 49 do Relatório de Referência da Quarta Comunicação (MCTI, 2020), e posteriormente pelos fatores de emissão por cada tipo de gás (2,3 para CH<sub>4</sub> em vegetação não florestal e 6,8 em vegetação florestal; e 0,21 para N<sub>2</sub>O em vegetação não florestal e 0,20 em vegetação florestal).

## Carbono orgânico do solo

O SEEG 12 reporta as emissões e remoções associadas à alteração nos estoques de carbono orgânico do solo, com base no mapa do Bernoux (2002), utilizado pela Quarta Comunicação.

A Quarta Comunicação calcula e reporta fatores médios para cada bioma relacionados a dois tipos de transição: vegetação nativa para pastagem e vegetação nativa para agricultura (MCTI, 2020). Esses fatores são aplicados sobre o mapa de carbono orgânico no solo (Bernoux, 2002), gerando então as emissões ou as remoções dependendo do tipo de transição e do bioma (Tabela 6).

Tabela 6. Fatores de alteração de carbono orgânico do solo em cultivo agrícola e em pastagem, por estado e bioma, apresentados na Quarta Comunicação Nacional (MCTI, 2020).

Classe de destino	Estado	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampa
Cultivo agrícola	Acre	0,87	-	-	-	-	-
Cultivo agrícola	Alagoas	-	-	0,83	0,86	-	-
Cultivo agrícola	Amazonas	0,87	-	-	-	-	-
Cultivo agrícola	Amapá	0,87	-	-	-	-	-
Cultivo agrícola	Bahia	-	0,91	0,88	0,9	-	-
Cultivo agrícola	Ceará	-	-	0,83	-	-	-
Cultivo agrícola	Distrito Federal	-	0,91	-	-	-	-
Cultivo agrícola	Espírito Santo	-	-	-	0,86	-	-
Cultivo agrícola	Goiás	-	0,91	-	0,91	-	-
Cultivo agrícola	Maranhão	0,92	0,91	0,91	-	-	-
Cultivo agrícola	Minas Gerais	-	0,91	0,88	0,9	-	-
Cultivo agrícola	Mato Grosso do	-	0,91	-	0,9	0,9	-
Cultivo agrícola	Mato Grosso	0,91	0,91	-	-	0,91	-
Cultivo agrícola	Pará	0,88	0,9	-	-	-	-
Cultivo agrícola	Paraíba	-	-	0,83	0,86	-	-
Cultivo agrícola	Pernambuco	-	-	0,83	0,86	-	-
Cultivo agrícola	Piauí	-	0,91	0,88	-	-	-
Cultivo agrícola	Paraná	-	0,91	-	0,91	-	-
Cultivo agrícola	Rio de Janeiro	-	-	-	0,87	-	-
Cultivo agrícola	Rio Grande do	-	-	0,83	0,86	-	-
Cultivo agrícola	Rondônia	0,89	0,91	-	-	-	-
Cultivo agrícola	Roraima	0,91	-	-	-	-	-
Cultivo agrícola	Rio Grande do Sul	-	-	-	0,93	-	0,93
Cultivo agrícola	Santa Catarina	-	-	-	0,92	-	-
Cultivo agrícola	Sergipe	-	-	0,83	0,86	-	-
Cultivo agrícola	São Paulo	-	0,9	-	0,87	-	-

Classe de destino	Estado	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampa
Cultivo agrícola	Tocantins	0,9	0,91	-	-	-	-
Pastagem	Acre	0,98	0,98	-	0,98	0,98	0,98
Pastagem	Alagoas	0,99	0,99	1,03	0,99	0,99	0,99
Pastagem	Amazonas	0,99	0,99	-	0,99	0,99	0,99
Pastagem	Amapá	0,93	0,93	-	0,93	0,93	0,93
Pastagem	Bahia	0,96	0,96	1,04	0,96	0,96	0,96
Pastagem	Ceará	-	-	1	-	-	-
Pastagem	Distrito Federal	0,99	0,99	-	0,99	0,99	0,99
Pastagem	Espírito Santo	0,98	0,98	-	0,98	0,98	0,98
Pastagem	Goiás	0,99	0,99	-	0,99	0,99	0,99
Pastagem	Maranhão	0,98	0,98	1,07	0,98	0,98	0,98
Pastagem	Minas Gerais	0,98	0,98	1,06	0,98	0,98	0,98
Pastagem	Mato Grosso do	0,99	0,99	-	0,99	0,99	0,99
Pastagem	Mato Grosso	0,98	0,98	-	0,98	0,98	0,98
Pastagem	Pará	0,98	0,98	-	0,98	0,98	0,98
Pastagem	Paraíba	0,97	0,97	1,01	0,97	0,97	0,97
Pastagem	Pernambuco	0,96	0,96	1,01	0,96	0,96	0,96
Pastagem	Piauí	0,96	0,96	1,02	0,96	0,96	0,96
Pastagem	Paraná	1	1	-	1	1	1
Pastagem	Rio de Janeiro	0,99	0,99	-	0,99	0,99	0,99
Pastagem	Rio Grande do	0,98	0,98	1	0,98	0,98	0,98
Pastagem	Rondônia	1	1	-	1	1	1
Pastagem	Roraima	0,99	0,99	-	0,99	0,99	0,99
Pastagem	Rio Grande do Sul	1	1	-	1	1	1
Pastagem	Santa Catarina	0,99	0,99	-	0,99	0,99	0,99
Pastagem	Sergipe	0,98	0,98	1,05	0,98	0,98	0,98
Pastagem	São Paulo	1	1	-	1	1	1
Pastagem	Tocantins	0,98	0,98	-	0,98	0,98	0,98

## Organização dos resultados

Com base nas áreas geradas pelo cálculo zonal, nos valores de estoque e incremento de carbono em cada classe e nas equações específicas para os diferentes tipos de transição, presentes no Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020), os valores de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) associados à cada mudança em cada ano foram calculados, sendo positivos no caso de emissões e negativos no caso de remoções.

Na tabela final do SEEG 12, para o setor MUT, as informações relacionadas aos processos envolvidos nas estimativas estão descritos em seis colunas principais:

1- Categoria emissora: relacionado ao principais processos estimados no escopo do setor (ver seção da Introdução), além do processo específico ao carbono orgânico do solo e das queimadas em vegetação nativa. As categorias são: Alterações de uso da terra, Resíduos florestais, Remoção por vegetação secundária, Remoção em áreas protegidas, Remoção por mudanças de uso da terra, Carbono orgânico do solo e Queimadas não associadas a desmatamento.

2- Sub-categoria emissora: distingue se os processos estão relacionados ao desmatamento, à recuperação da vegetação nativa, ou outro sub-processo. As categorias são: Desmatamento, Regeneração, Vegetação nativa estável, Outras mudanças de uso da terra e Queimadas não associadas a desmatamento. Vale ressaltar que a sub-categoria “Regeneração” se refere ao primeiro ano de detecção da recuperação de uma vegetação nativa. Após o segundo ano, a vegetação secundária é considerada estável até que haja uma nova conversão e, portanto, se encaixa na sub-categoria “Vegetação nativa estável”.

3- Produto ou sistema: descreve as transições de acordo com as grandes classes da Quarta Comunicação Nacional.

4- Detalhamento: transições específicas e com as classes originais do mapeamento de uso e cobertura da terra do MapBiomas.

5- Recorte: descreve se o processo ocorre fora ou dentro de áreas protegidas. Uma ressalva é a de que a categoria de “Resíduos florestais” é calculada de acordo com uma proporção de queima da área desmatada a nível de município, então não é possível identificar se ocorre fora ou dentro de áreas protegidas.

6- Atividade geral: descreve a atividade econômica a que o processo se refere. Se divide em: Agricultura, Pecuária e Outros.

Além dessas informações, as informações territoriais, tipo de gás e se a estimativa é uma emissão ou remoção estão também apresentadas (colunas Região, Estado, Município, Bioma, Gás e Emissão/Remoção/Bunker). As estimativas de emissões NCI também estão inclusas na tabela, mas são diferenciadas pela denominação “Emissões NCI” na coluna Emissão/Remoção/Bunker.

## Emissões por queimadas não associadas ao desmatamento

As emissões por queimadas em vegetação nativa não associadas ao desmatamento, assim como as emissões derivadas de outros processos que geram degradação (e.g. extração seletiva de madeira e efeito de borda) são emissões não contabilizadas nos Inventários Nacionais (NCI). Entretanto, os efeitos da degradação por extração seletiva de madeira, fogo e efeitos de borda podem gerar a redução de 4 a 50% dos estoques de carbono (Rutishauer et al, 2015, Silva jr. et al, 2018, Silva et al, 2020). Parte da biomassa perdida é recuperada, porém o processo de recuperação pode ser lento e frequentemente novos distúrbios se sucedem antes que a floresta retorne ao estado original. A contabilização das emissões derivadas dos processos de degradação e sua inclusão no inventário nacional são essenciais para que se tenha estimativas mais acuradas em todo o território nacional.

Frente a este cenário, desde 2018, a equipe do SEEG MUT tem feito um esforço para entender melhor o fenômeno do fogo em vegetação que permanece nativa e como ele afeta as emissões brasileiras. O Anexo 2 aborda com mais detalhes este esforço, seus métodos, resultados e desafios.

Os mapas anuais de uso e cobertura da terra do MapBiomas Coleção 9 e o novo produto de área queimada do MapBiomas Fogo Coleção 3.1, com 30 m de resolução espacial para o período entre 1985-2023, permitiram ao SEEG refinar as estimativas de emissões anuais líquidas de  $CO_2e$  e outros GEE decorrentes da queima do combustível acima do solo em savanas, florestas e campos nos biomas brasileiros. Apenas as emissões de gases não- $CO_2$  (convertidas para  $CO_2e$ ) são apresentadas em áreas campestres, assumindo que emissões líquidas de  $CO_2$  nessas áreas são neutras. As queimadas não associadas ao desmatamento, ou seja, em áreas que não foram posteriormente desmatadas, totalizaram 2,5 Pg de emissões líquidas de  $CO_2e$  entre 1990 e 2020, sendo que 9% deste total ocorreu em savanas, 89% em florestas e o restante em vegetação campestre. A Amazônia foi o bioma que mais contribuiu com esta estimativa (60%), seguido pelo Cerrado (32%) (Figura 4).

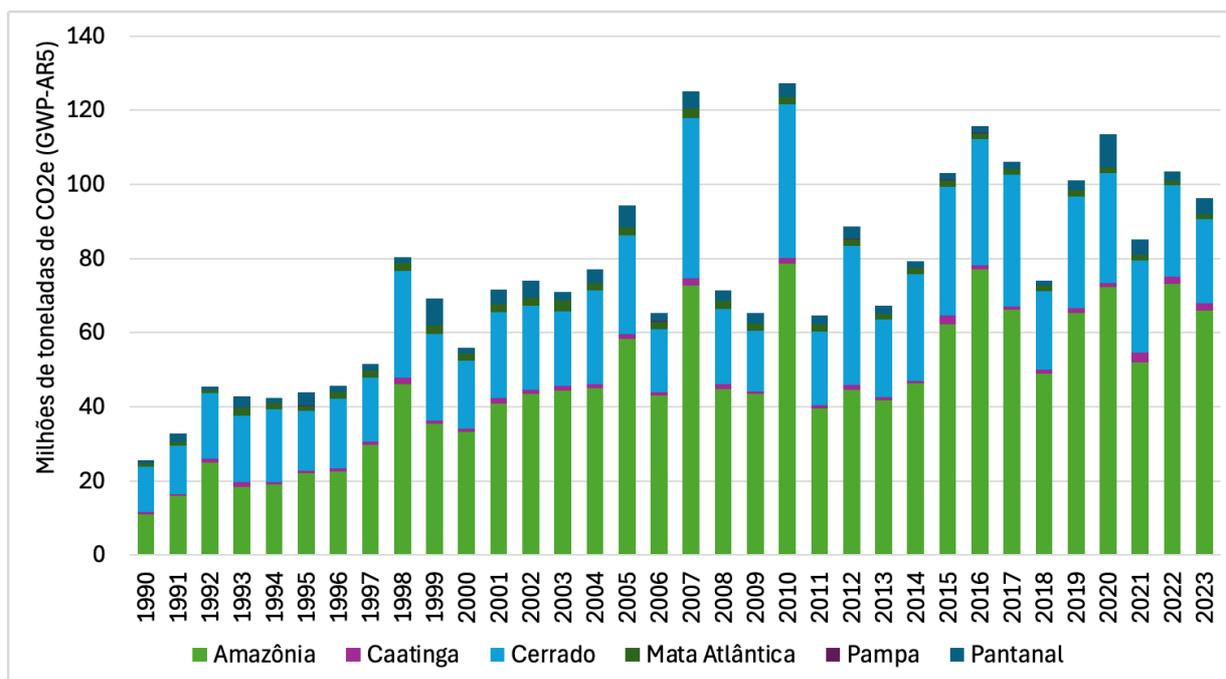
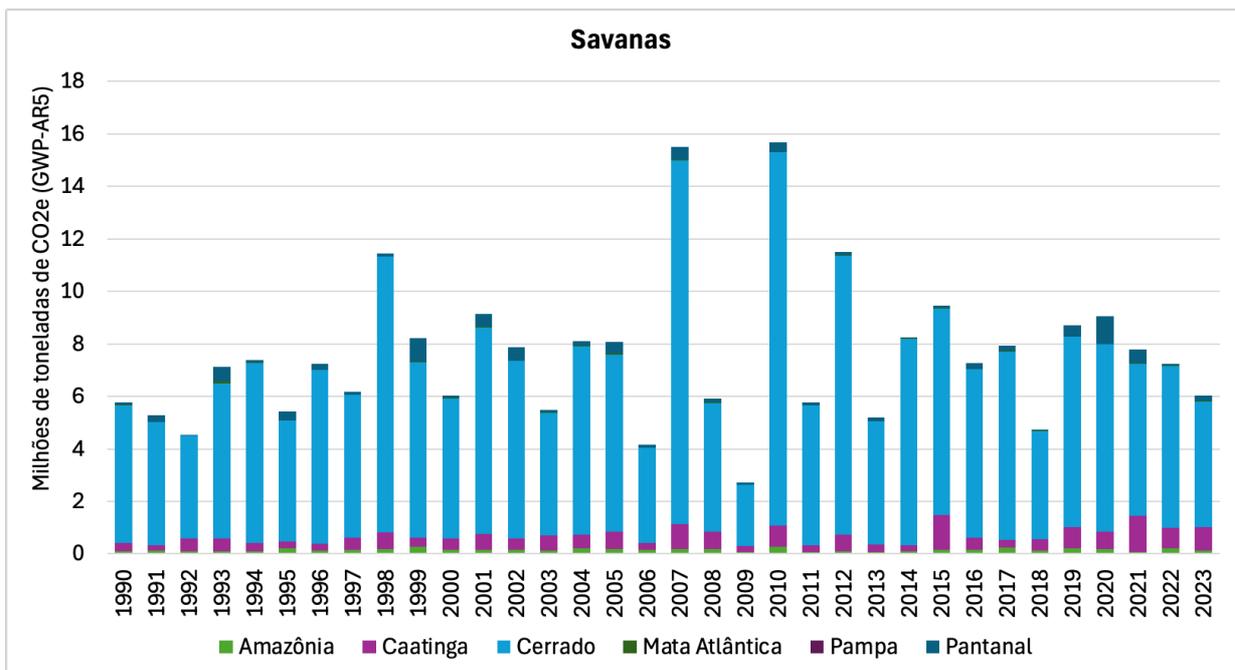
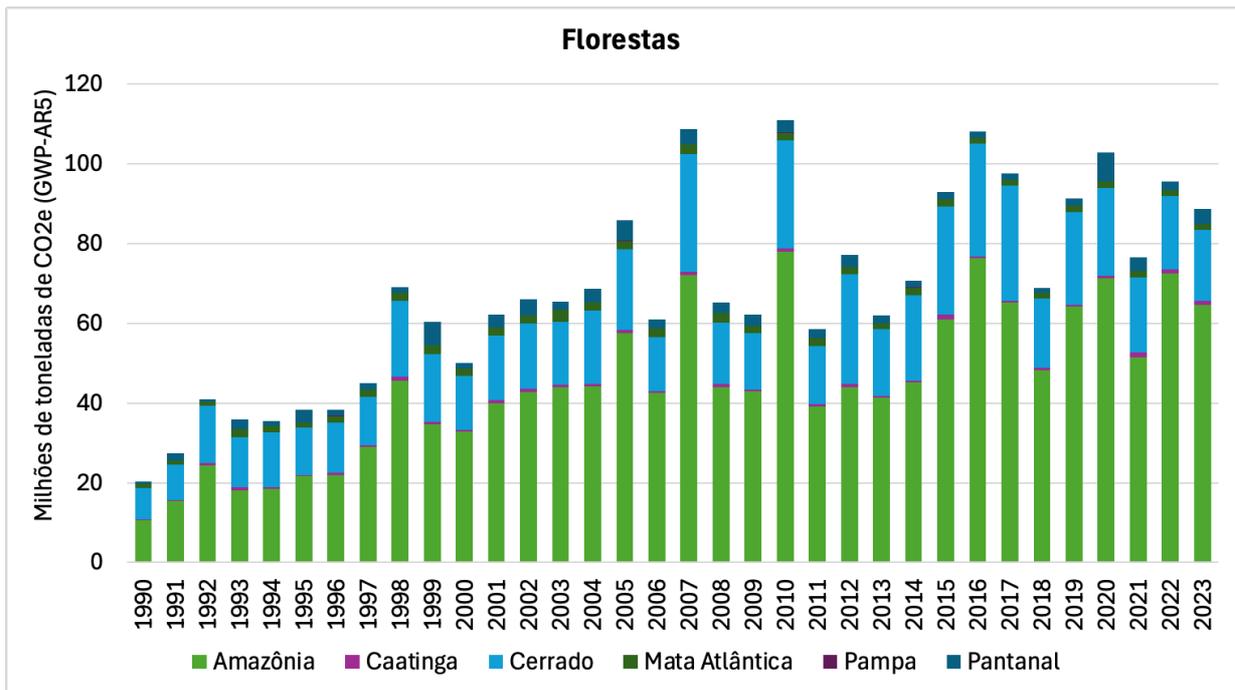


Figura 4. Emissões líquidas de CO<sub>2</sub>e (GWP AR5) por fogo em áreas naturais não associadas a desmatamento entre 1990 e 2020 por bioma no Brasil.

Em geral, há um padrão de aumento das emissões em florestas até 2005 (94 Mt CO<sub>2</sub>e) que está associado ao acúmulo de emissões por decomposição da necromassa (material lenhoso e liteira). Após 2005 o padrão das emissões se mantém estável até 2014 com média de 84 Mt CO<sub>2</sub>e ano<sup>-1</sup>, com picos nos anos de seca extremas (e.g., 1998/1999, 2005, 2007, 2010 e 2015/2016) (Aragão et al., 2018; Silva Junior et al., 2019). Há um aumento mais pronunciado a partir de 2015, provavelmente em função dos incêndios causados pelo El Niño, que se mantém até o final da série temporal. As emissões em savanas têm emissões acima da média nos anos de 1998, 2007 e 2010 (Figura 5), refletindo também os efeitos da seca no aumento do fogo em áreas naturais e consequentemente nas emissões de GEE.



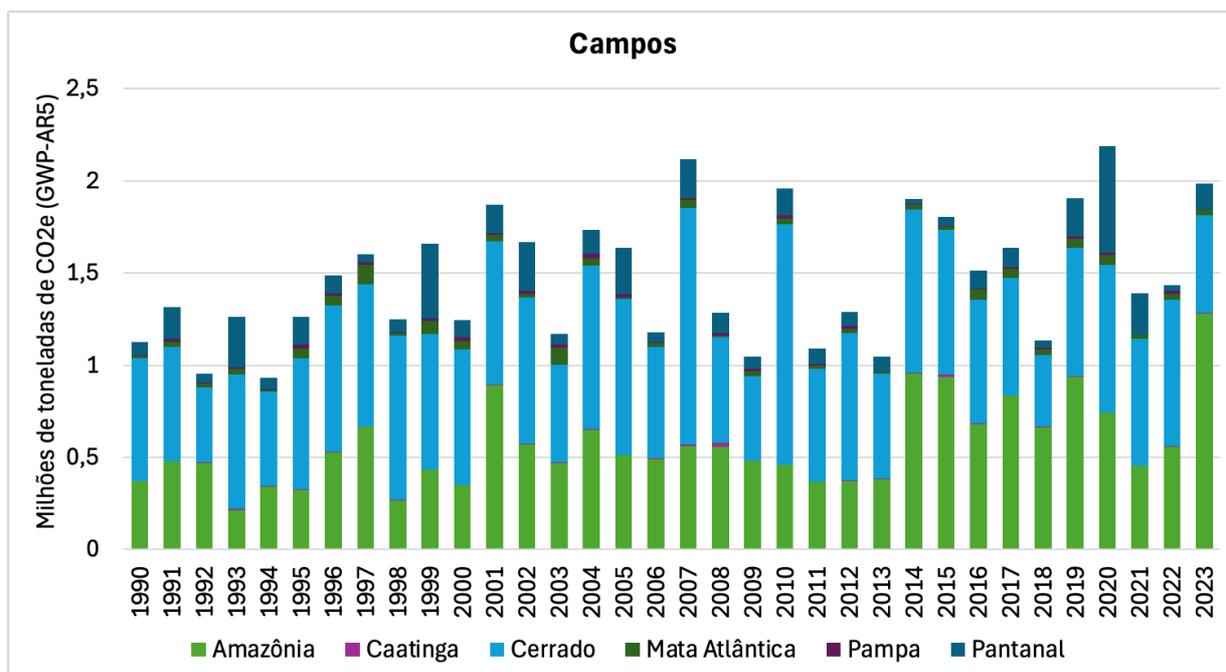


Figura 5. Emissões líquidas de CO<sub>2</sub>e (GWP AR5) por fogo em áreas naturais de florestas, savanas e campos não associadas a desmatamento.

Na atual versão (SEEG 12), foi implementado o modelo FATE de emissões líquidas por incêndios florestais, resultantes do balanço entre o processo de mortalidade de árvores e regeneração da vegetação nos anos que sucedem o fogo. As emissões líquidas para todos os biomas são apresentadas pela primeira vez no SEEG considerando além das emissões por combustão, os processos de dinâmica da vegetação após o fogo para as formações florestais e savânicas. Os dados de dinâmica da vegetação utilizados para o cálculo das emissões em florestas são provenientes do bioma Amazônia e os dados utilizados para savanas são provenientes do bioma Cerrado.

Entre 1990 e 2022, quando as emissões por fogo não associado a desmatamento são adicionadas às emissões do setor MUT, essas tem uma contribuição de 33, 26, 2, 30, 27 e 8% ao total emitido nos biomas Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal, Caatinga e Pampa respectivamente. A partir de 2007, quando as emissões do setor MUT diminuem significativamente, as emissões por fogo passam a ter maior contribuição proporcional. A contribuição das emissões por fogo perante as emissões líquidas do setor MUT atingiu seu máximo em 2010, com a adição de 44% das emissões líquidas. Entre 2010 e 2023 a média da contribuição das emissões por fogo foi de 24%. Esse resultado mostra que a medida que o desmatamento reduz e a regeneração de florestas secundárias aumenta, as emissões líquidas do setor MUT reduzem, entretanto o fogo não associado a

desmatamento que afeta vegetação nativa ganha um papel importante no balanço das emissões do país, se tornando um novo vetor de emissões de GEE para atmosfera.

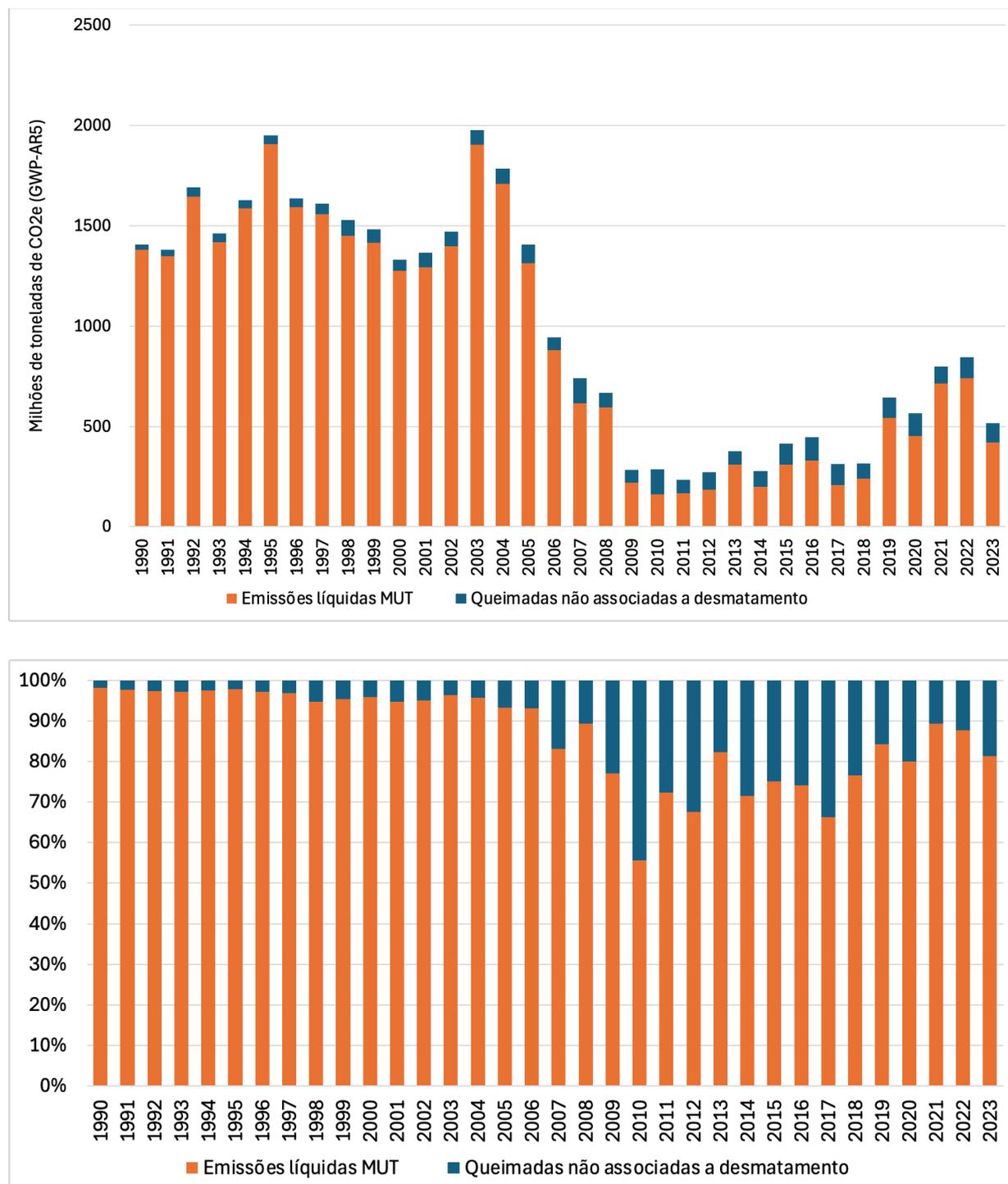


Figura 6. Contribuição total e percentual das emissões líquidas de CO2e (GWP AR5) por fogo não associado a desmatamento quando essas são adicionadas às emissões do setor MUT. Os valores percentuais representam as proporções

relativas ao setor MUT e as queimadas não associadas a desmatamento entre 1990-2022.

Destaca-se que as estimativas aqui apresentadas são conservadoras por dois motivos. Primeiro, mapeamentos automatizados de área queimada a partir de dados de satélite frequentemente possuem limitações para detecção de incêndios florestais de baixa intensidade em florestas densas (Giglio et al., 2009), como em regiões úmidas da Amazônia (Pontes-Lopes et al., 2021). Segundo, as emissões por queimadas em áreas naturais posteriormente desmatadas foram desconsideradas para evitar dupla-contagem, uma vez que o cálculo das emissões por desmatamento no SEEG MUT considera a perda dos estoques de biomassa e necromassa originais. Mais detalhes sobre estes esforços, métodos, resultados, incluindo as estimativas de gases não CO<sub>2</sub>, desafios e limitações estão dispostos no Anexo 2.

## **Box 2. Emissão de carbono por efeito de borda e corte seletivo de madeira**

Além dos incêndios florestais, a degradação florestal pode ter outras causas, como o efeito de borda e a extração seletiva de madeira, que também levam à emissão de gases de efeito estufa (Lapola et al, 2023). Neste box, apresentamos o resultado do exercício realizado para contabilizar as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) nas bordas florestais antrópicas no Brasil e pela extração seletiva de madeira no bioma Amazônia do Brasil.

Para o exercício, foram utilizados dados do MapBiomas (Coleção 9) e do DETER/INPE. Para os dados do MapBiomas, foi considerada apenas a classe de “Formação Florestal” e para o DETER/INPE as classes de corte seletivo “desordenado” e “geométrico”. A partir dos mapas de floresta obtidos do MapBiomas foram mapeadas as idades das bordas florestais (120 metros de profundidade) e aplicado o modelo desenvolvido por Silva Junior et al (2020) - aqui, pela primeira vez, calculamos as emissões tardias, ou seja, as emissões da decomposição da biomassa perdida na mortalidade das árvores devido ao efeito de borda - foi considerada uma taxa de decomposição de 19% ao ano (Chambers et al, 1999). Para os dados de corte seletivo, foram considerados apenas os

polígonos que estavam sobrepostos aos polígonos de floresta nos mapas do MapBiomias - foi considerada uma perda de 19,6% para cada evento anual único ou repetido de corte seletivo (Lapola et al, 2023). Para as duas abordagens, foram consideradas somente as emissões nas áreas de florestas estáveis em 2023, evitando assim a dupla contagem com as emissões de desmatamento.

Entre 1990 e 2023, foram emitidos 2,03 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> nas bordas florestais em todo o Brasil (Figura 1), o equivalente a uma emissão média de 59,77 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> ao ano - a menor emissão anual ocorreu em 1990, o equivalente a 12,10 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, e a maior emissão em 2006, que totalizou uma emissão de 68,20 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. Por outro lado, entre 2017 e 2023 no bioma Amazônia, o corte seletivo foi responsável por uma emissão de 136,23 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (Figura 2), o equivalente a uma emissão média de 19,46 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> ao ano - a menor emissão anual ocorreu em 2017, o equivalente a 7,52 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, e a maior emissão em 2023, que totalizou uma emissão de 29,10 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>.

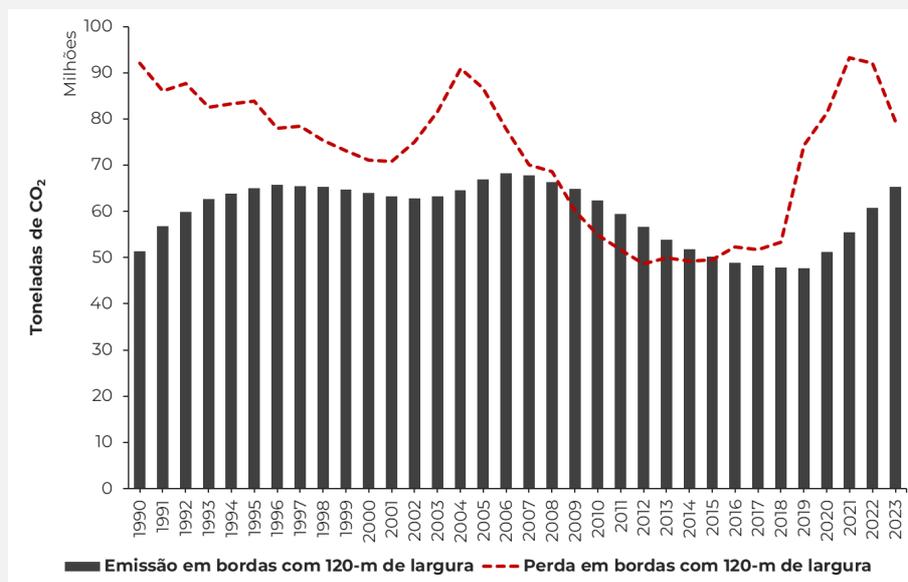


Figura 1. Emissões líquidas de CO<sub>2</sub> por efeito de borda no Brasil. A linha tracejada vermelha representa as perdas líquidas de estoques de carbono nas bordas florestais com 120 metros de profundidade. As

barras pretas representam as emissões devido à decomposição do carbono perdido pela mortalidade de árvores devido ao efeito de borda.

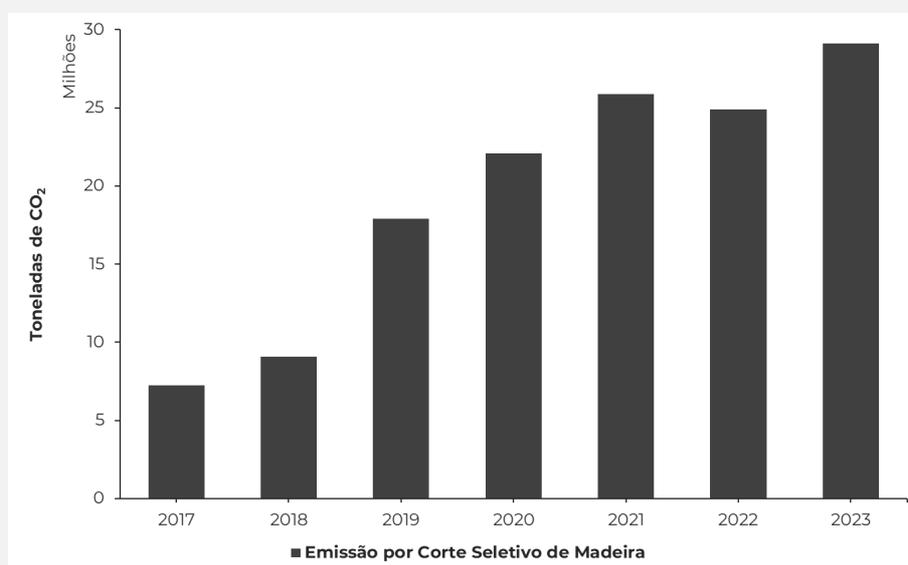


Figura 2. Emissões brutas de CO<sub>2</sub> devido ao corte seletivo de madeira no bioma Amazônia do Brasil.

## Cálculo das emissões em carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e)

Existem duas abordagens para determinação do carbono equivalente: o GWP (Global Warming Potential) e o GTP (Global Temperature Change Potential). O primeiro é definido pela influência dos gases na alteração do balanço energético da Terra e, o segundo, pela influência no aumento de temperatura, em um prazo de 100 anos. É mais comum o reporte das emissões com base em GWP, e os resultados nesta Nota estão baseados em GWP.

Além disso, os valores de conversão para carbono equivalente dos diferentes gases foram sendo atualizados de acordo com os Relatórios do IPCC, o que é indicado pelo sufixo AR2, AR4 e AR5. O último relatório é indicado por AR6 (Forster et al, 2021), mas o que utilizamos

para reportar os resultados é o AR5 para ser comparável com os números da Quarta Comunicação Nacional. Mas o SEEG calculou as conversões para CO<sub>2</sub> equivalente de acordo com todos os métodos e relatórios, para fins de comparação, e esses fatores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores de conversão dos diferentes gases considerados no presente método para carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) de acordo com o método e relatório do IPCC

	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
GTP-AR2	5	270
GWP-AR2	21	310
GTP-AR4	5	270
GWP-AR4	25	298
GTP-AR5	4	234
GWP-AR5	28	265
GTP-AR6	4.7	233
GWP-AR6	27	273

### 3. Quadro de qualidade dos dados

Dada a complexidade dos cálculos necessários para consolidar o SEEG e devido à opção de usar apenas dados disponíveis de forma pública e gratuita, considerou-se necessário divulgar uma avaliação da qualidade dos dados. Assim, qualquer usuário ou leitor pode aferir a confiabilidade de cada cálculo e eventualmente contribuir para aumentar a robustez dos dados. A Tabela 8 a seguir, qualifica os dados do SEEG de 1990 a 2019 e segue a seguinte legenda:

Tabela 8. Legenda utilizada para qualificar os dados do SEEG no período de 1990 a 2020.

Aspecto	Valores
TIER	1 Tier 1 do IPCC - fatores globais
	2 Tier 2 do IPCC - fatores nacionais ou regionais
	3 Tier 3 do IPCC - fatores específicos por planta
EXISTÊNCIA DE DADO DE ATIVIDADE	1 Dados existentes para cálculo de acordo com Tier do 3º Inventário (inclui dados existentes em associações de classe, mesmo que não seja público). Dados que só existem nas empresas ou agentes econômicos específicos não serão considerados.
	2 Dados incompletos
	3 Dados não existentes
DISPONIBILIDADE DE DADOS DE ATIVIDADE	1 Dados disponíveis de forma pública e gratuita
	2 Dados disponíveis com alguma restrição (pago; em local físico específico, ou disponível apenas mediante solicitação específica)
	3 Dados não disponíveis

FATORES DE EMISSÃO	1	Fator explícito, com referência
	2	Fator implícito com correlação ( $R^2$ ) maior ou igual a 0,7
	3	Fator implícito com correlação ( $R^2$ ) menor que 0,7
NECESSIDADE DE APRIMORAMENTO	1	Sem necessidade de aprimoramento
	2	Necessidade de aprimoramento de método ou obtenção dos dados para cálculo
	3	Necessidade de aprimoramento de método E obtenção de dados para cálculo
QUALIDADE GERAL DO DADO	1	Dado confiável; capaz de reproduzir 3º Inventário
	2	Dado confiável para estimativa; inventário pode gerar diferenças significativas
	3	Dado pouco confiável ou de difícil avaliação

Além da tabela geral da qualidade de dados, estimamos também a qualidade da informação disponível para alocação das emissões por estado (Tabela 9).

Tabela 9. Legenda da qualidade de dados utilizada para alocação das emissões para a escala estadual no SEEG no período de 1990-2020.

Aspecto	Valores	
OCORRÊNCIA DE ALOCAÇÃO	1	Alocação possível de toda emissão nacional nos E estados (não fica resíduo/montante não alocado)
	2	Alocação parcialmente possível. Parte das emissões nacionais não foi alocada.
	3	Alocação para os estados não foi possível

<b>CRITÉRIO DE ALOCAÇÃO</b>	1	Critério de alocação está diretamente relacionado com os fatores de emissão
	2	Critério de alocação usa fatores indiretos com alta correlação com os fatores diretos.
	3	Critério de alocação usa fatores indiretos com baixa correlação com fatores diretos.
<b>EXISTÊNCIA DE DADO DE ATIVIDADE</b>	1	Dados existentes para cálculo de acordo com Tier do 4º Inventário (inclui dados existentes em associações de classe, mesmo que não públicos). Dados que só existem nas empresas ou agentes econômicos específicos não serão considerados.
	2	dados incompletos
	3	dados não existentes
<b>DISPONIBILIDADE DE DADOS DE ATIVIDADE</b>	1	dados disponíveis de forma pública e gratuita
	2	dados disponíveis com alguma restrição (pagos; em local físico específico, ou disponível apenas mediante solicitação específica)
	3	dados não disponíveis
<b>FATORES DE EMISSÃO</b>	1	fator explícito, com referência
	2	fator implícito com correlação R2 maior ou igual a 0,7
	3	fator implícito com correlação R2 menor que 0,7
<b>NECESSIDADE APRIMORAMENTO</b>	1	sem necessidade de aprimoramento
	2	necessidade de aprimoramento de método OU obtenção dos dados para cálculo
	3	necessidade de aprimoramento de método E obtenção de dados para cálculo
<b>QUALIDADE GERAL DA ALOCAÇÃO</b>	1	dado confiável; capaz de reproduzir 4º inventário
	2	dado confiável para estimativa; inventário pode gerar diferenças significativas
	3	dado pouco confiável ou de difícil avaliação

A planilha com a qualidade de dados estará disponível no site do SEEG, explicando as razões para as classificações '2' e '3' de cada dado. Esta planilha visa qualificar os dados que apresentamos quando comparado com a qualidade dos dados do inventário.

A precisão também pode ser aumentada se mapas espacialmente explícitos de biomassa dos biomas e de carbono do solo forem utilizados em conjunto com os dados espacialmente explícitos de uso e cobertura da terra.

## 4. Diferenças para o inventário nacional e estimativas de emissões oficiais

O SEEG 12 utilizou os dados do Quarto Inventário Nacional (MCTI, 2020) publicado em dezembro de 2020. Nossas estimativas são diferentes em relação às estimativas do Quarto Inventário (MCTI, 2020) em alguns aspectos e, no presente método, adotamos algumas simplificações, que poderão ser melhoradas nas próximas edições do SEEG MUT, de acordo com a disponibilidade de dados. As diferenças são as seguintes:

- As estimativas de emissões e remoções são anuais, e, portanto, as equações aplicadas no presente método não consideram o parâmetro T, presente em algumas equações do Quarto Inventário (MCTI, 2020);
- Os estoques de carbono das classes de vegetação nativa foram estimados para cada classe de vegetação nativa do MapBiomass por bioma, a partir da média ponderada de acordo com a representatividade das fitofisionomias do IBGE no bioma disponível no Quarto Inventário (MCTI, 2020), que no Quarto Inventário é calculado a partir de mapas de biomassa dos biomas;
- Apresentamos estimativas simplificadas de estoque e incremento de carbono referentes às classes de uso agropecuário, que no Quarto Inventário é calculado por estado;
- Apresentamos estimativas simplificadas de estoque e incremento de carbono referentes à classe de silvicultura (floresta plantada), que no Quarto Inventário é calculado de acordo com a proporção de Eucalipto e Pinus por estado;
- Não calculamos as emissões referentes à atividade de corte seletivo na Amazônia, considerada no Quarto Inventário.

## 5. Resultados

A tabela final com os resultados do SEEG 12 para o setor de Mudanças de uso da terra e florestas estão publicamente disponíveis na plataforma do SEEG ([seeg.eco.br](http://seeg.eco.br)).

A Figura 7 apresenta as emissões brutas por todas as categorias calculadas no setor Mudança de Uso da Terra e Floresta a nível Nacional, e a Figura 8, as emissões totais líquidas nacionais e por bioma. As emissões brutas tiveram uma alta em 2021 e 2022. Em 2023, as emissões brutas decaíram quase 24% em comparação com 2022 (de 1.392 para 1.062 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e). As emissões líquidas decaíram 43% (de 741 para 419 milhões de toneladas) entre 2022 e 2023.

As alterações de uso da terra representam 93% das emissões brutas no último ano, seguido de uma pequena parcela de queimas associadas ao desmatamento (5%) e de alterações no estoque de carbono orgânico do solo (2%). As remoções brutas no final da série se dão principalmente por remoções em áreas protegidas (60%, 386 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e), seguida de remoções por vegetação secundária (40%, 254 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e; Figura 7).

Do total das emissões brutas em 2023, 98% representa desmatamento, com 1.039 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e. Desse total de emissões por desmatamento, 65% (678 milhões de toneladas) são provenientes de desmatamento na Amazônia, seguido do Cerrado, com 19% (202 milhões de toneladas).

As emissões líquidas no bioma Amazônia passaram de 593 milhões de toneladas em 2022 para 211 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e em 2023, um decaimento de 65%. Todos os outros biomas apresentaram aumento nas emissões líquidas no último ano da série. O Cerrado observou um aumento de 41% entre 2022 e 2023, com emissões líquidas de 147 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e em 2023. As emissões líquidas no Pampa aumentaram 240% entre 2022 e 2023. No Pantanal, também, as emissões líquidas tiveram um aumento expressivo de 220% em 2023. Por fim, a Mata Atlântica observou um aumento de 16% e a Caatinga, um aumento de 62% nas emissões líquidas em 2023 (Figura 8).

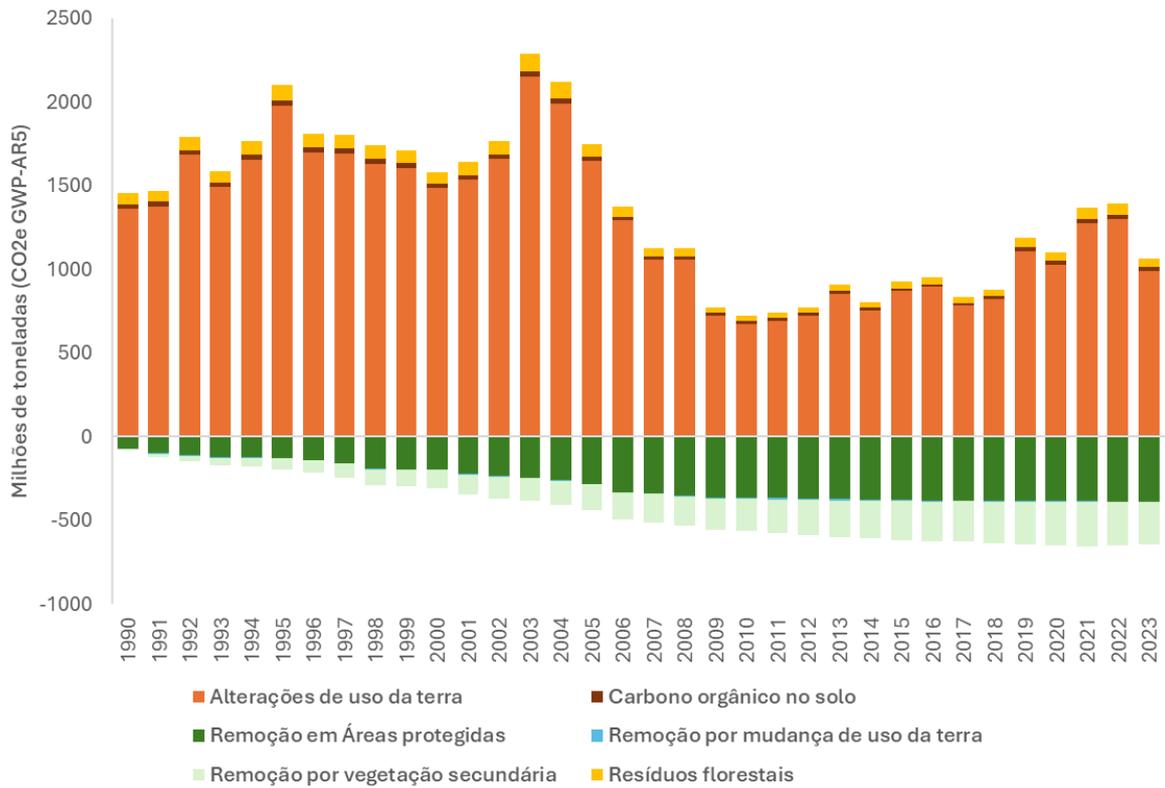


Figura 7. Emissões e remoções nacionais em milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e (GWP AR5) por categoria do setor MUT ao longo do período de 1990-2023.

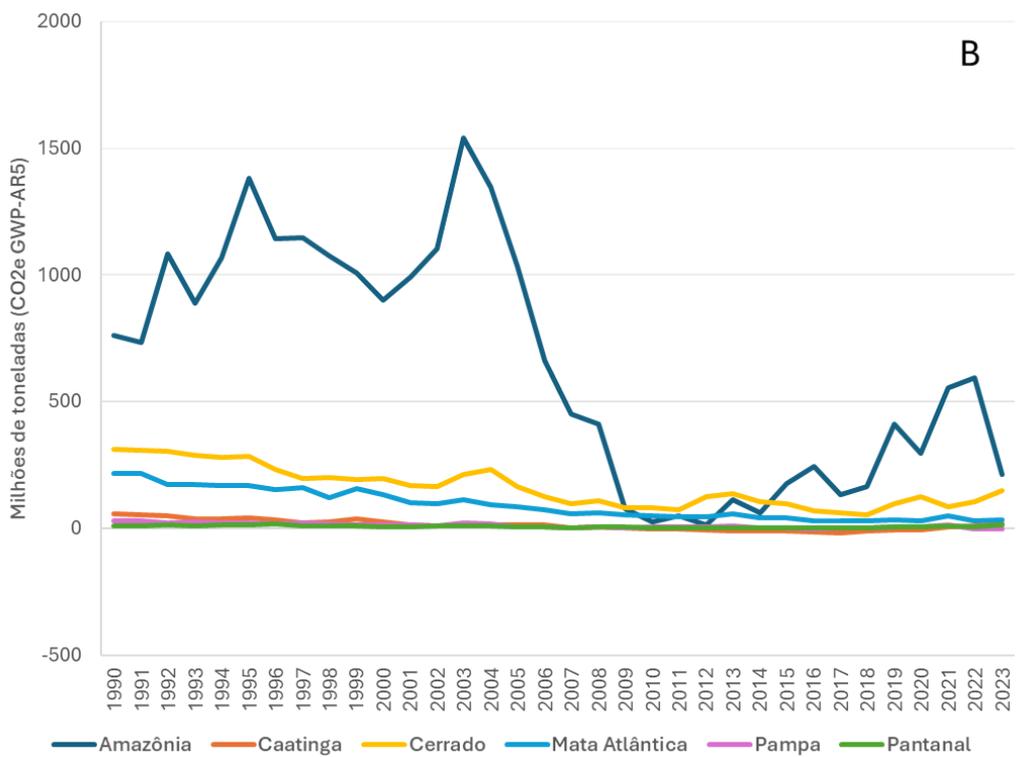
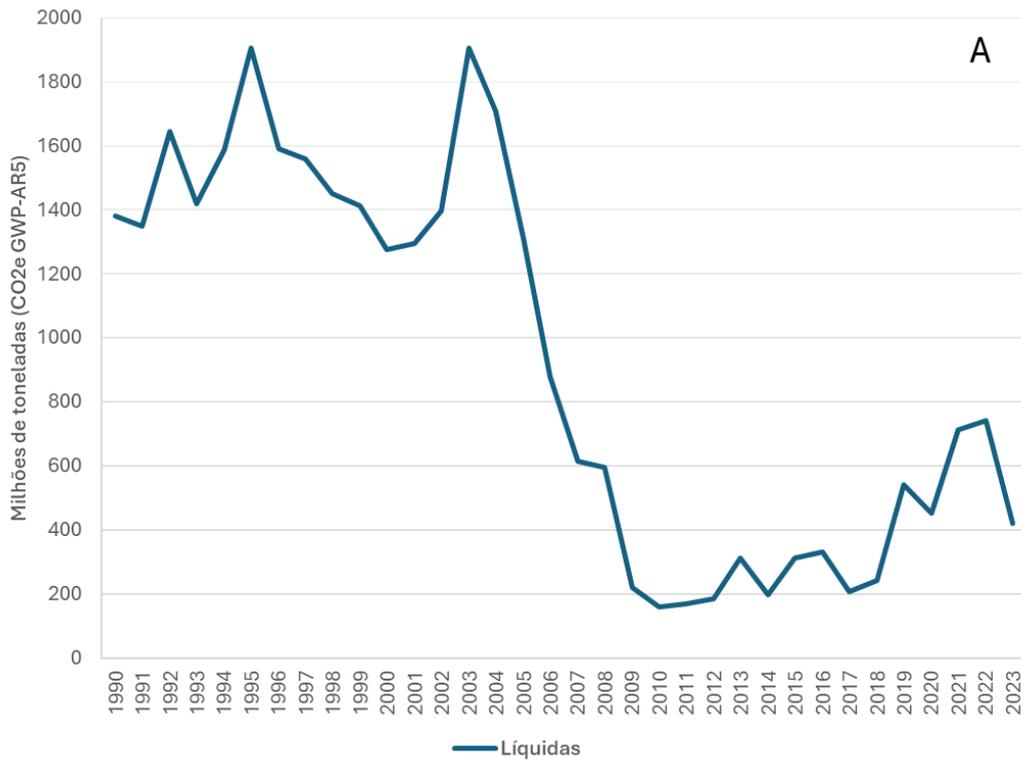


Figura 8. Emissões líquidas totais nacionais (a) e Emissões brutas por bioma (b) em milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e (GWP AR5) associadas ao setor MUT ao longo do período de 1990-2023.

Com relação aos padrões estaduais, diminuições expressivas nas emissões brutas foram observadas principalmente no Pará (35%), Amazonas (59%), Rondônia (49%) e Acre (71%). Na contramão, os estados com maiores emissões brutas no último ano e que apresentaram aumento entre 2022 e 2023 são Maranhão (15%), Bahia (21%) e Tocantins (69%) (Figura 9).

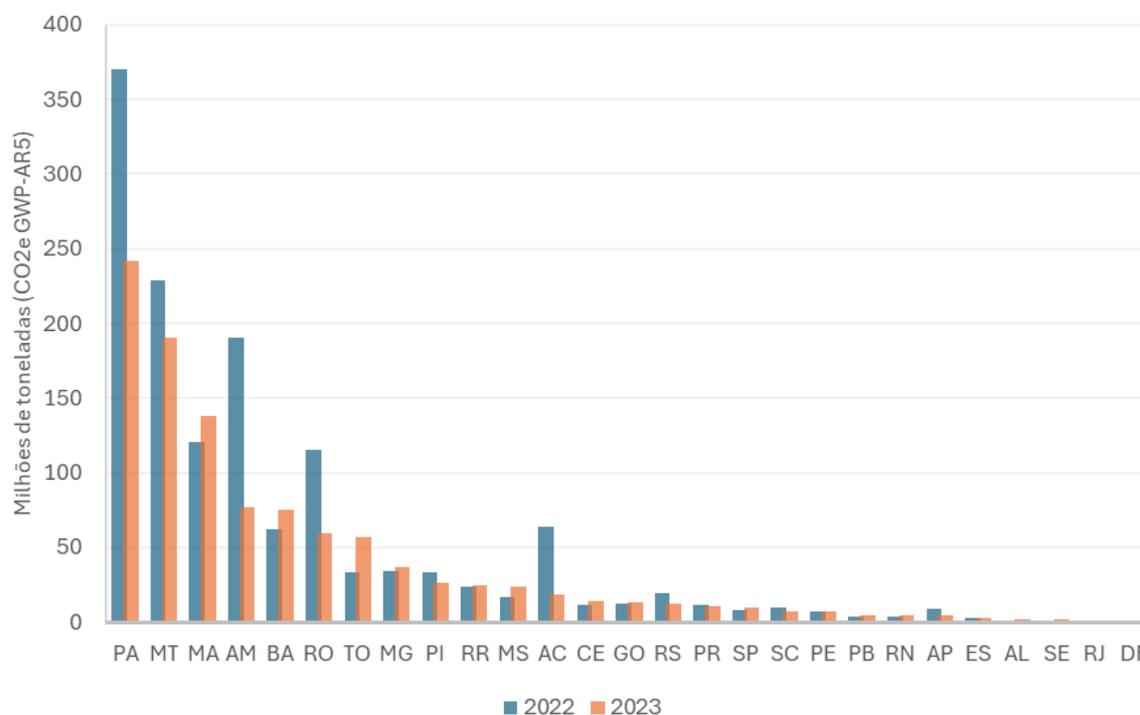


Figura 9. Emissões brutas por estado em milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e (GWP AR5) associadas ao setor MUT em 2022 e 2023.

Os municípios da Amazônia são os que puxam o padrão de emissões no país, seguidos dos municípios do Cerrado. O município que mais emitiu em 2023 é São Félix do Xingu, seguido de Altamira, ambos no Pará. Já em termos de emissões líquidas, Porto Velho-RO assume a liderança, seguido de São Félix do Xingu. Altamira, por conta de sua grande extensão de áreas protegidas, não entra no ranking dos dez municípios mais emissores em termos de emissão líquida (Figura 10).

No bioma Caatinga, municípios da Bahia são os mais numerosos no ranking e apenas um município (Juvenília-MG), em quinta posição, não se encontra no Nordeste (Figura 11). No Cerrado, os municípios do MATOPIBA são os que dominam o ranking (Figura 12). Na Mata Atlântica, os municípios mais emissores se concentram em dois grupos: um no sul da Bahia e outro na divida entre São Paulo e Paraná (Figura 13). Apenas Carai-MG, em décima posição, se encontra fora desses dois grupos. No Pampa, Uruguaiana e Alegrete são os dois municípios mais emissores em termos de emissão bruta, enquanto Piratini-RS se destaca como o maior

emissor líquido (Figura 14). No Pantanal, Corumbá-MS lidera o ranking com folga, sendo também o maior município em área (Figura 15).

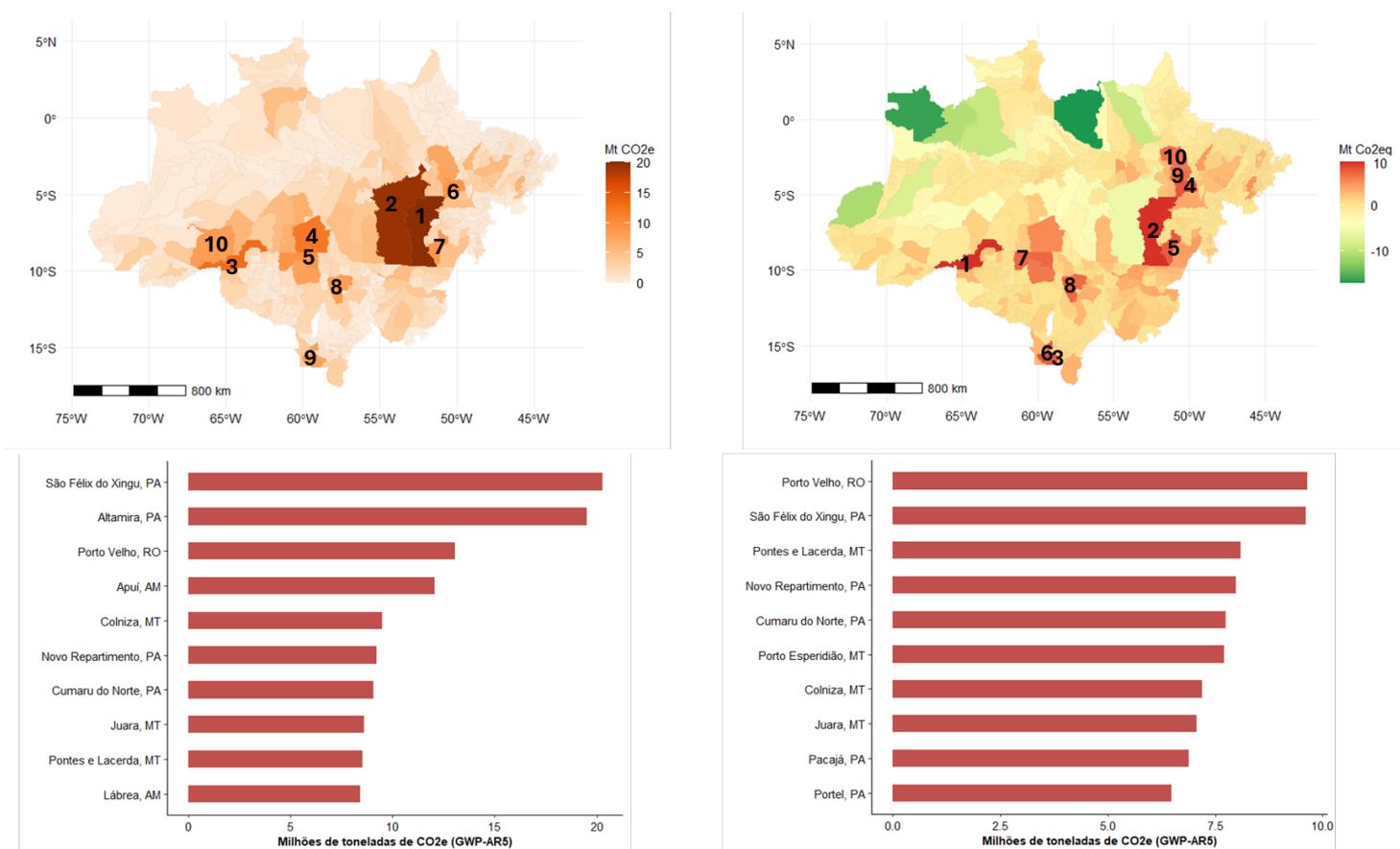


Figura 10. Localização e ranking dos dez municípios amazônicos que mais emitiram em 2023, em termos de emissões brutas (esquerda) e emissões líquidas (direita).

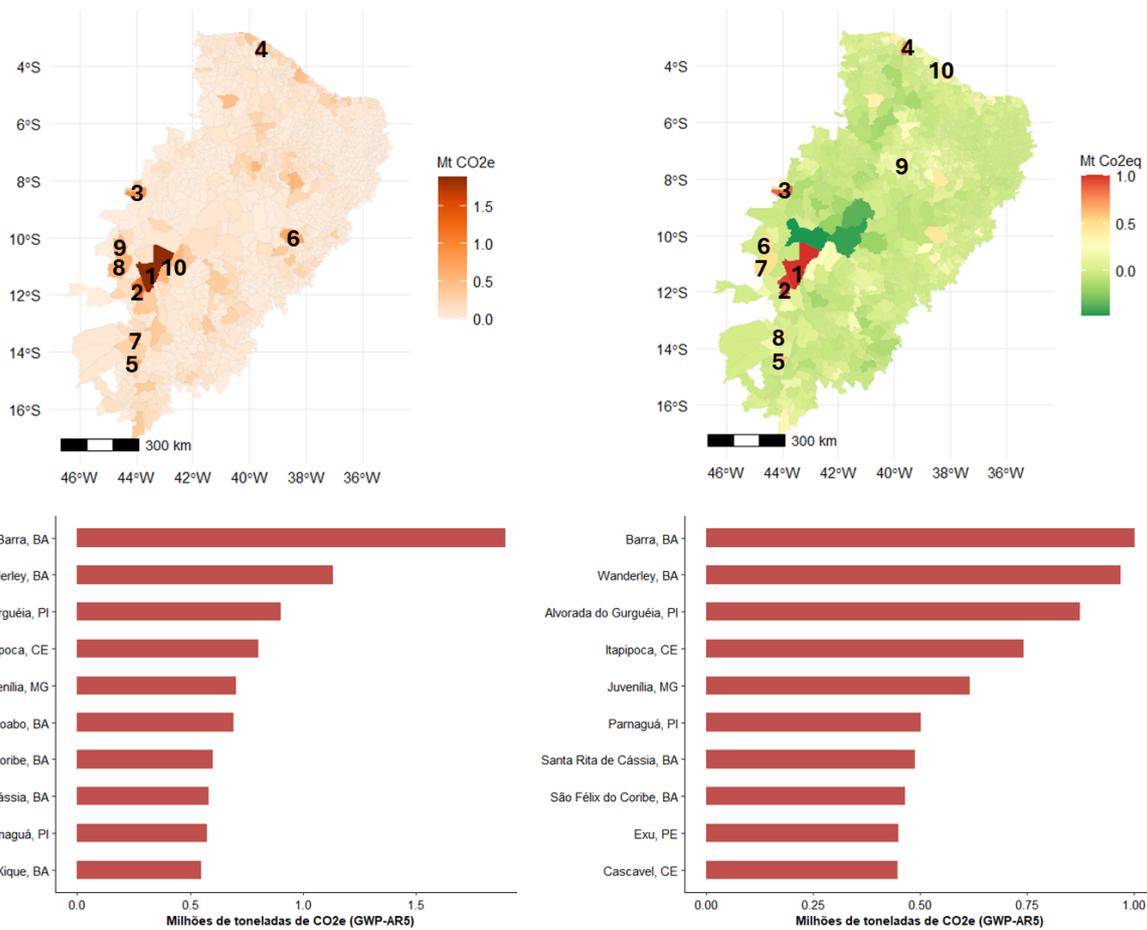


Figura 11. Localização e ranking dos dez municípios da Caatinga que mais emitiram em 2023, em termos de emissões brutas (esquerda) e emissões líquidas (direita).

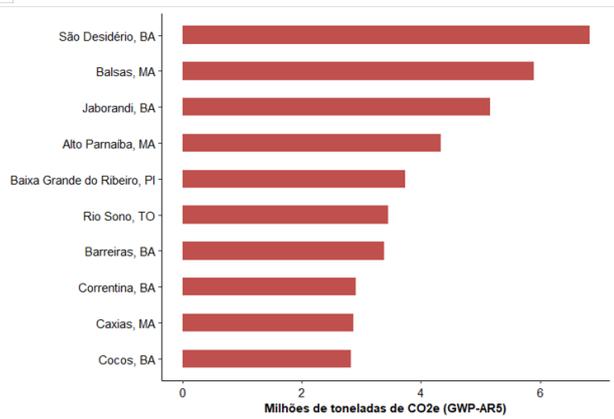
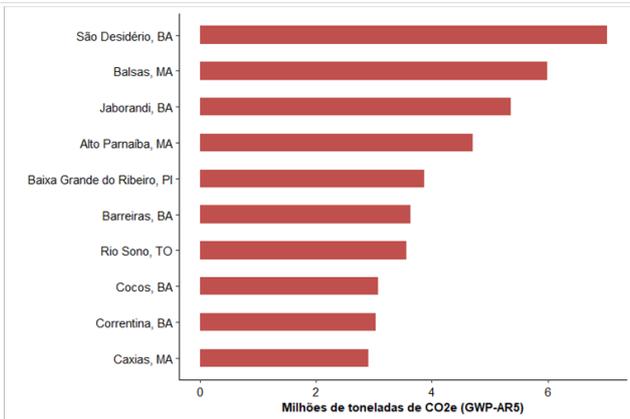
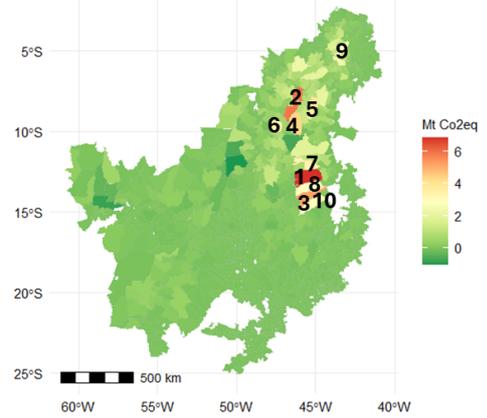
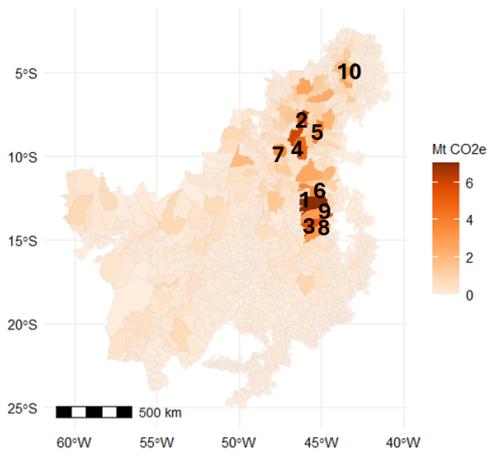


Figura 12. Localização e ranking dos dez municípios do Cerrado que mais emitiram em 2023, em termos de emissões brutas (esquerda) e emissões líquidas (direita).

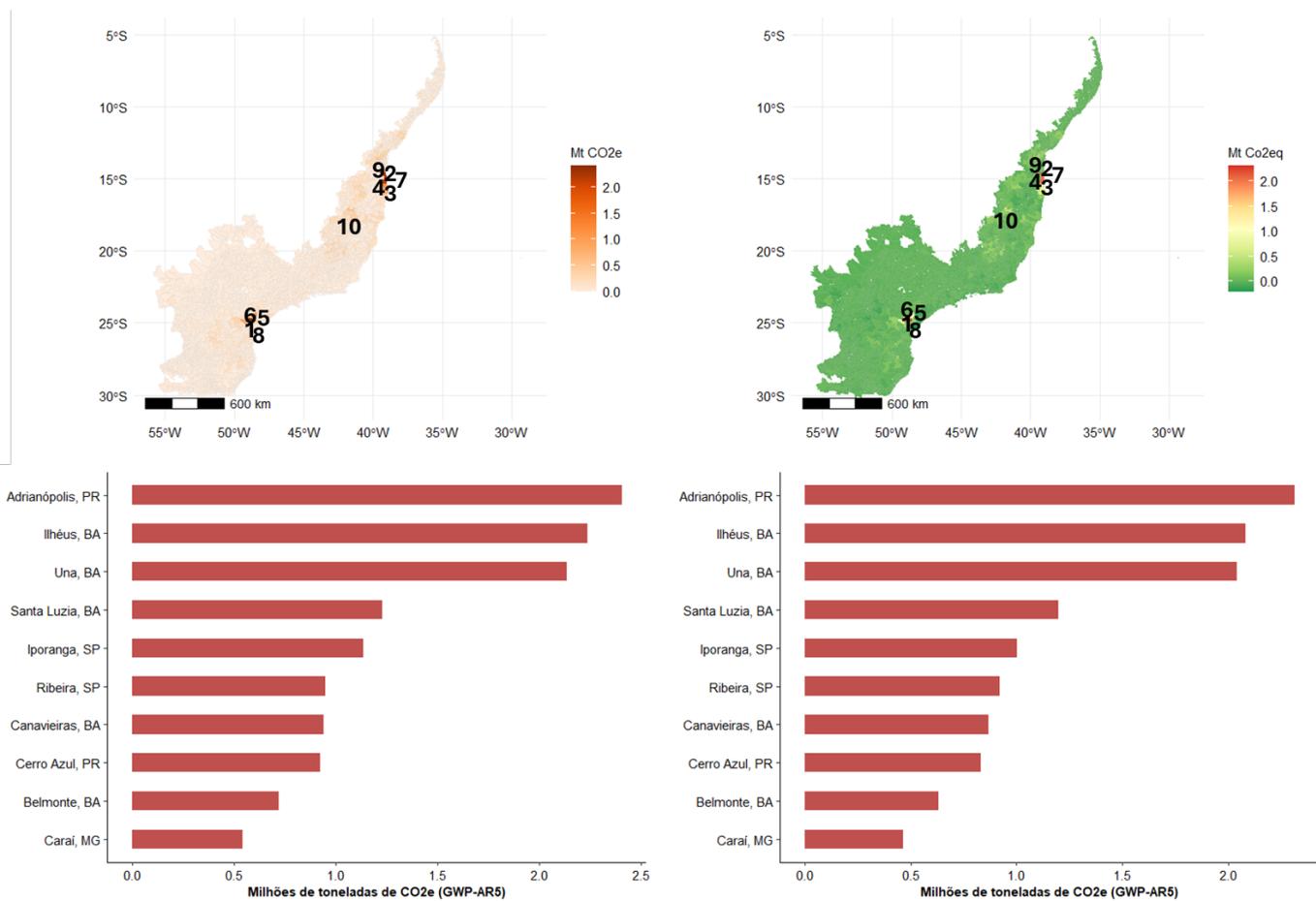


Figura 13. Localização e ranking dos dez municípios da Mata Atlântica que mais emitiram em 2023, em termos de emissões brutas (esquerda) e emissões líquidas (direita).

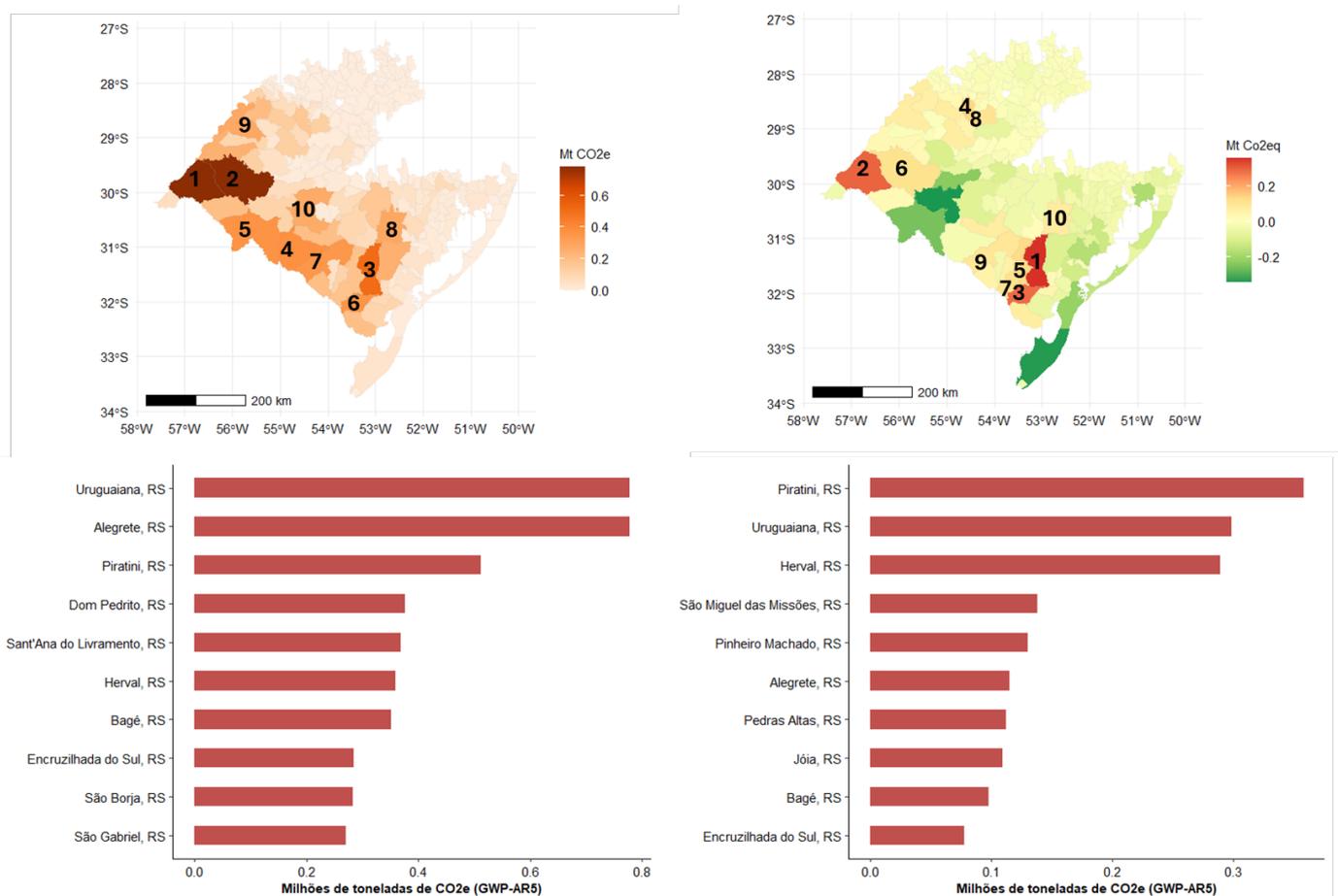


Figura 14. Localização e ranking dos dez municípios do Pampa que mais emitiram em 2023, em termos de emissões brutas (esquerda) e emissões líquidas (direita).

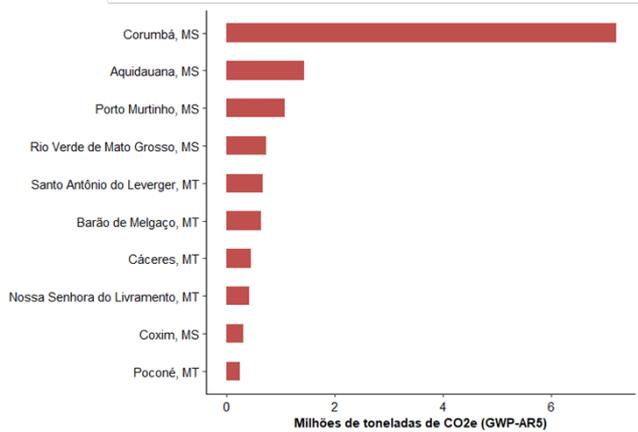
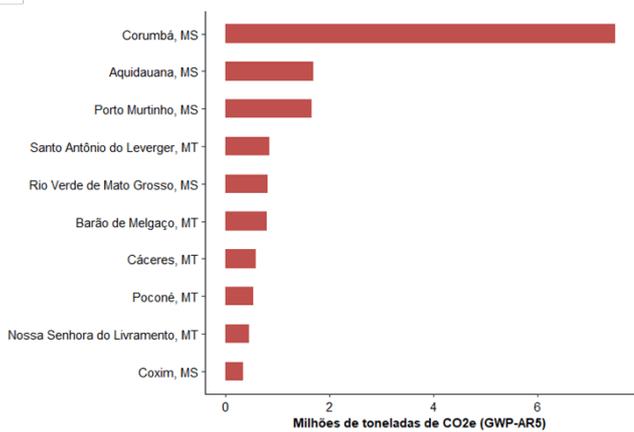
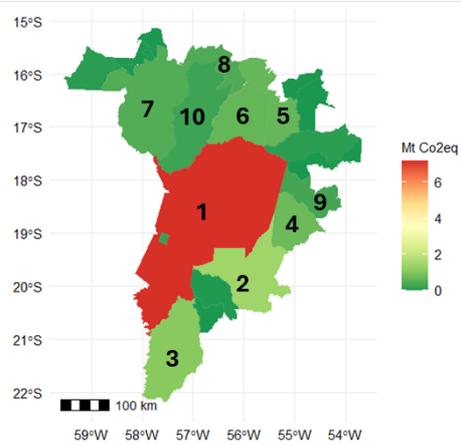
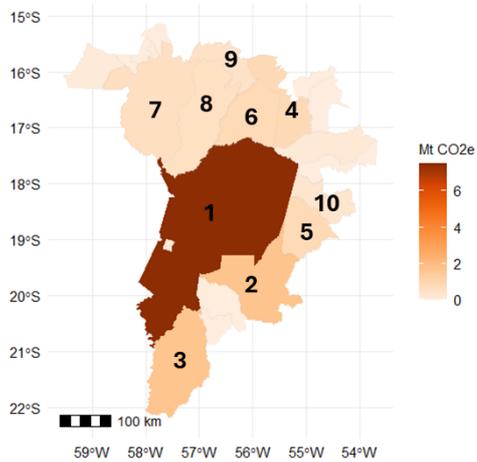


Figura 15. Localização e ranking dos dez municípios no Pantanal que mais emitiram em 2023, em termos de emissões brutas (esquerda) e emissões líquidas (direita).

## 6. Referências

- Alencar, A., Shimbo, J. Z., Lenti, F., Balzani Marques, C., Zimbres, B., Rosa, M., et al. 2020. Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing*, 12(6), 924.
- Baker, T. R. et al. 2004. Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, London, v.359, n.1443, p.353-365.
- Berenguer, E., Malhi, Y., Brando, P., Cardoso Nunes Cordeiro, A., Ferreira, J., França, F., Chesini Rossi, L., Maria Moraes de Seixas, M., Barlow, J. 2018 Tree growth and stem carbon accumulation in human-modified Amazonian forests following drought and fire. *Phil. Trans. R. Soc. B* 373: 20170308.
- Brando, P. M., Paolucci, L., Ummenhofer, C. C., Ordway, E. M., Hartmann, H., Cattau, M. E., Rattis, L., Medjibe, V., Coe, M. T., & Balch, J. 2019. Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47, 555–581.
- Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Lewis, S. L., Vásquez Martinez, R., Alexiades, M., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A., Aragão, L. E. O. C., Araujo-Murakami, A., Arets, E. J. M. M., Arroyo, L., ... Zagt, R. J. 2015. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344–348.
- Bustamante, M. M. C., Silva, J. S. O., Cantinho, R. Z., Shimbo, J. Z., Oliveira, P. V. C., Santos, M. M. O., et al. 2018. Engagement of scientific community and transparency in C accounting: the Brazilian case for anthropogenic greenhouse gas emissions from land use, land-use change and forestry. *Environmental Research Letters*, 13(5), 055005.
- Caúla, R. H., Oliveira-Júnior, J.F., Lyra, G. B., Delgado, R. C., Heilbron Filho, P. F. L. 2015. Overview of fire foci causes and locations in Brazil based on meteorological satellite data from 1998 to 2011. *Environmental Earth Sciences*, 74, 1497–1508.
- Fearnside, P. M. 1996. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, 80(1–3), 21–34.
- Fonseca, M. G., Anderson, L. O., Arai, E., Shimabukuro, Y. E., Xaud, H. A., Xaud, M. R., ... Aragão, L. E. 2017. Climatic and anthropogenic drivers of northern Amazon fires during the 2015/2016 El Niño event. *Ecological applications*.
- Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, doi:10.1017/9781009157896.009.

Fundação S.O.S Mata Atlântica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017. Relatório Técnico: Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2015-2016.

Gatti L V et al 2021 Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595, 388–93

Heinrich V H A et al 2023 The carbon sink of secondary and degraded humid tropical forests. *Nature*, 615, 436–42.

IBAMA, 2013. Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite – PMDBBS. Disponível em: [siscom.ibama.gov.br/monitoramentobiomas](http://siscom.ibama.gov.br/monitoramentobiomas). Acessado em: 10 de outubro de 2020.

IBGE, 2012. Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2. ed., Rio de Janeiro, 276 p.

IBGE, 2019. Mapa de Biomas e Sistema Costeiro-Marinheiro do Brasil - 1:250 000. IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomas.html?=&t=acesso-ao-produto>. Accessed 5 July 2020.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Projeto Prodes – Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite. Disponível em: [www.obt.inpe.br/prodes](http://www.obt.inpe.br/prodes); Acessado em: outubro de 2019.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Genebra, Suíça. Disponível em: [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpoglulucf/gpoglulucf\\_files/GPG\\_LULUCF\\_FULL.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpoglulucf/gpoglulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf).

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Genebra, Suíça.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Genebra, Suíça.

Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Metcalfe, D. B., Paiva, R., Quesada, C. A., Almeida, S., Anderson, L., Brando, P., Chambers, J. Q., da Costa, A. C. L., Hutyrá, L. R., Oliveira, P., Patiño, S., Pyle, E. H., Robertson, A. L., & Teixeira, L. M. 2009. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, 15(5), 1255–1274.

Malhi, Y., Doughty, C. E., Goldsmith, G. R., Metcalfe, D. B., Girardin, C. A. J., Marthens, T. R., del Aguila-Pasquel, J., Aragão, L. E. O. C., Araujo-Murakami, A., Brando, P., da Costa, A. C. L., Silva-Espejo, J. E., Farfán Amézquita, F., Galbraith, D. R., Quesada, C. A., Rocha, W., Salinas-Revilla, N., Silvério, D., Meir, P., & Phillips, O. L. 2015. The linkages between photosynthesis, productivity, growth and biomass in lowland Amazonian forests. *Global Change Biology*, 21(6), 2283–2295.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. 2010. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

MCTI – Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. 2013. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Relatório técnico.

MCTI – Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. 2015. Relatório de Referência: Setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas. Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatório Técnico. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI.

MCTI – Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. 2016. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

MCTI – Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. 2020. Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

Miranda, S. C. 2012. Variação espacial e temporal da biomassa vegetal em áreas de Cerrado. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Universidade de Brasília.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. 2013. Biomas. Disponível em: [www.mma.gov.br/biomas](http://www.mma.gov.br/biomas). Acessado em: 10 de outubro de 2013.

Nogueira E.M. et al. 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*, v.256, n.11, p.1853-1867.

Nunes, E. L., Costa, M. H., Malhado, A. C. M., Dias, L. C. P., Vieira, S. A., Pinto, L. B., & Ladle, R. J. 2012. Monitoring carbon assimilation in South America's tropical forests: Model specification and application to the Amazonian droughts of 2005 and 2010. *Remote Sensing of Environment*, 117, 449–463.

Projeto MapBiomas – Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, acessado em agosto de 2020, através do link: <http://mapbiomas.org/>.

Pyle, E. H., Santoni, G. W., Nascimento, H. E. M., Hutyrá, L. R., Vieira, S., Curran, D. J., van Haren, J., Saleska, S. R., Chow, V. Y., Carmago, P. B., Laurance, W. F., & Wofsy, S. C. 2008. Dynamics of carbon, biomass, and structure in two Amazonian forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(G1), G00B08.

Rocha H.R.D. et al. 2002. Measurements of CO<sub>2</sub> exchange over a woodland savanna (Cerrado sensu stricto) in southeast Brasil. *Biota Neotropica*, São Paulo, v.2, n.1, p.1-11.

Scaranello M. A. D. S. 2010. Dinâmica da comunidade arbórea de floresta ombrófila densa de terras baixas e de restinga no Parque Estadual da Serra do Mar, SP. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Silva Junior, C. H. L., Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Shimabukuro, Y. E., Vancutsem, C., Achard, F., Beuchle, R., Numata, I., Silva, C. A., Maeda, E. E., Longo, M., & Saatchi, S. S. (2020). Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. *Science Advances*, 6(40), 1–9.

Vieira, S., De Camargo, P. B., Selhorst, D., Da Silva, R., Hutyra, L., Chambers, J. Q., Brown, I. F., Higuchi, N., Dos Santos, J., Wofsy, S. C., Trumbore, S. E., & Martinelli, L. A. 2004. Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests. *Oecologia*, 140(3), 468–479.

Wright, S. J. 2013. The carbon sink in intact tropical forests. *Global Change Biology*, 19(2), 337–33

# Anexo 1 – Cálculo das emissões por degradação

## MÉTODO

Para a detecção da ocorrência e frequência das áreas queimadas não associadas ao desmatamento no Brasil, foram utilizados os mapas de área queimada com 30 m de resolução espacial da Coleção 2 do MapBiomias Fogo ([www.mapbiomas.org](http://www.mapbiomas.org)) em uma série histórica anual de 1985 a 2022. Para a identificação da vegetação nativa associada às áreas queimadas foram utilizados os mapas anuais de cobertura e uso da terra com 30 m de resolução espacial da Coleção 8 do MapBiomias ([www.mapbiomas.org](http://www.mapbiomas.org)) também de 1985 a 2022.

Visando não analisar queimadas associadas ao processo de desmatamento, foram selecionadas apenas as formações florestais, savânicas e campestres que persistiram por toda a série histórica até o ano de 2022 sem serem desmatadas. Assim, foram gerados mapas de queimadas anuais, de 1985 a 2022, sobre a vegetação nativa que persistiu até 2022. Além disso, para estas mesmas áreas naturais estáveis, foram gerados mapas anuais de recorrência do fogo.

Os mapas anuais de queimadas em formações florestais, savânicas e campestres estáveis e os mapas anuais de frequência do fogo, juntamente com uma série de outras variáveis coletadas na literatura, foram, então, utilizados para o cálculo das emissões de GEE por queimadas não associadas ao desmatamento. Foram quantificadas as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> para formações florestais e savânicas, levando em conta a dinâmica da vegetação pós-fogo (i.e. mortalidade e regeneração). Adotou-se metodologias distintas para florestas e savanas, independentemente do bioma, conforme detalhado nas seções a seguir. As emissões de CO<sub>2</sub> das formações campestres foram consideradas neutras porque essas formações recuperam rapidamente a sua biomassa após um evento de queima (Andrade, 1998; Gomes et al., 2020b; Montenegro, 2019). No entanto, as emissões de gases não-CO<sub>2</sub> através do processo de combustão em formações campestres foram contabilizadas. Além disso, destaca-se que o cálculo das emissões líquidas de CO<sub>2</sub> foi aprimorado em formações florestais e savânicas. Nesta versão SEEG 12 integramos as emissões por combustão e no período pós-fogo em florestas em um único modelo (i.e. FATE *bookkeeping model*), e para formações savânicas utilizamos dados de dinâmica da vegetação para estimar as remoções de CO<sub>2</sub> pós fogo.

Juntamente com fatores de combustão e emissões da literatura, os mapas anuais de queimadas em formações savânicas e campestres estáveis e os mapas de material combustível superficial foram, então, usados para gerar as estimativas de emissões de GEE pela aplicação da seguinte equação (adaptada de IPCC 2006, Volume 4, Capítulo 2):

$$E_{GEE,wd} = A \times M_{wd} \times CF_{wd} \times EF_{GEE} \times 10^{-3} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:  $E_{GEE,wd}$  = quantidade de GEE emitido no processo de combustão (em Mg) em função de cada GEE (e.g., CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, etc., Tabela 1) e da classe de material combustível (wd) considerada (CWD ou FWD); A = área queimada (em ha); M = massa de combustível disponível para combustão (Mg ha<sup>-1</sup>); CF = fator de combustão por classe de material combustível (adimensional); e EF = fator de emissão por GEE (em g kg<sup>-1</sup>).

Tabela 1. Fatores de emissão por combustão para gases de efeito estufa para formações florestais e savânicas (g kg<sup>-1</sup> de matéria seca queimada). Fonte: IPCC, 2006; MCTI, 2015.

<b>Gases</b>	<b>Formações savânicas e campestres</b>	<b>Formações florestais</b>
CO <sub>2</sub>	1613	1580
CO	65	104
CH <sub>4</sub>	2,3	6,8
N <sub>2</sub> O	0,21	0,2
NO <sub>x</sub>	3,9	1,6

## Cálculo das emissões em formações campestres

Para as formações campestres foram calculadas apenas as emissões de gases não-CO2 decorrentes do processo de combustão utilizando a equação 1. Para isso, o mapa de biomassa acima do solo (AGB) foi adicionado ao mapa de material combustível grosso (CWD) constituindo o combustível principal sob o qual foi aplicado um único fator de combustão (tabela 2). Separadamente, foi considerado o mapa de serapilheira sob o qual foi aplicado fator de combustão referente a esse material.

Tabela 2. Valores de biomassa acima do solo, necromassa acima do solo, e fatores de combustão utilizados para as formações campestres de cada bioma brasileiro.

Bioma	Biomassa acima do solo (AGB, Mg ha <sup>-1</sup> )	Necromassa (Mg ha <sup>-1</sup> )		Fator de combustão (%)		Referências
		Fina (FWD) <sup>a</sup>	Grossa (CWD) <sup>b</sup>	FWD	CWD	
<b>Amazônia</b>	13,1 - 62,7	0 - 0,4	0,3 - 20,5	96,8	76,4	1
<b>Caatinga</b>	1,53 - 5,42	0 - 0,03	0,38 - 0,10	64,9	-	2
<b>Cerrado</b>	0,73 - 4,17	0 - 0,11	0,11 - 3,63	88,3	33,1	3 ao 15
<b>Mata Atlântica</b>	0,72 - 4,17	0 - 0,78	0,05 - 2,85	76,9	-	16-17
<b>Pampa</b>	0,73 - 120, 58	0 - 13,26	3,63 - 4,38	94,4	-	1-2
<b>Pantanal</b>	3,93 - 4,17	0 - 0,11	0,38 - 0,39	78,9	59,6	19 ao 24

(a) serapilheira e material combustível lenhoso com até 0,69 cm de diâmetro

(b) material combustível lenhoso com mais de 0,7 cm de diâmetro

1 Barbosa e Fernside (2005)

2 Ribeiro (2010)

3 Castro & Kauffman (1998)

4 Ward et al. (1992)

5 Schmidt et al. (2016)

6 Santos et al. (2021)

7 Conceição e Pivello (2011)

8 Kauffman et al. (1994)

- 9 Miranda et al. (1996)
- 10 Silva (1999)
- 11 Medeiros (2002)
- 12 Castro-Neves (2000)
- 13 Gorgone-Barbosa et al. (2015)
- 14 Rissi et al. (2016)
- 15 Rodrigues et al. (2021)
- 16 White et al. (2017)
- 17 Seger et al (2013)
- 18 Fidelis et al (2010)
- 19 Rodrigues (1999)
- 20 Pott (1982)
- 21 Cardoso et al. (2003)
- 22 Cardoso et al. (2000)
- 23 Cardozo et al. (2012)
- 24 Pozer e Nogueira et al. (2004)

### Cálculo das emissões em formações savânicas

Para as formações savânicas, foram calculadas primeiramente as emissões decorrentes do processo de combustão do material combustível superficial. Para isso, os mapas de biomassa acima do solo (AGB), madeira morta (CWD) e serapilheira (FWD) da Quarta Comunicação Nacional (QCN) (MCTI, 2020) foram checados e corrigidos para compatibilização com os mapas de cobertura da vegetação nativa do MapBiomás (Coleção 9). Para as savanas, o mapa de CWD considera o estoque de madeira morta com diâmetro  $\geq 0,7$  cm, relativas às classes de tempo de combustão de 10, 100 e 1000 horas (Brown 1974, Ottmar et al., 2001). Já o mapa de FWD considera o estoque de madeira morta com diâmetro  $< 0,7$  cm (1 hora de tempo de combustão) e a serapilheira, acrescidos de 26% do valor da AGB (Ribeiro et al., 2011). Esta correção da FWD com a AGB foi realizada para considerar o componente herbáceo e graminoso vivo, que é um importante combustível nas savanas e é considerado

na construção dos fatores de combustão (Gomes et al., 2020a). A adição do estrato herbáceo e graminoso vivo foi considerada apenas no cálculo das emissões de gases não-CO<sub>2</sub>, tendo em vista que esse estrato se recupera por completo, sendo as emissões de CO<sub>2</sub> desse estrato neutralizadas no ano que sucede o fogo.

Os estoques de AGB, material combustível e fatores de combustão utilizados estão disponíveis na Tabela 3, enquanto os fatores de emissão estão disponíveis na segunda coluna da Tabela 1. Destaca-se que esta metodologia introduz o mapeamento das classes de material combustível para o cálculo das emissões de GEE por queimadas não associadas ao desmatamento e fatores de combustão mais específicos.

Tabela 3. Valores de biomassa acima do solo, necromassa acima do solo, e fatores de combustão utilizados para as formações savânicas de cada bioma brasileiro.

Bioma	Biomassa acima do solo (AGB, Mg ha <sup>-1</sup> )	Necromassa (Mg ha <sup>-1</sup> )		Fator de combustão (%)		Referências
		Fina (FWD) <sup>a</sup>	Grossa (CWD) <sup>b</sup>	FWD	CWD	
<b>Amazônia</b>	4,7 - 234,98	0,2 - 32,62	0,18 - 22,1	87,3	45,9	1,2,3,4,5,6
<b>Caatinga</b>	6,7 - 203,22	0,5 - 22,42	0 - 44,36	87,3	45,9	1,2,3,4,5,6
<b>Cerrado</b>	0 - 168,76	0 - 27,26	0 - 24,81	87,3	45,9	1,2,3,4,5,6
<b>Mata Atlântica</b>	16,26 - 150,2	0,78 - 8,44	0,8 - 5,96	87,3	45,9	1,2,3,4,5,6
<b>Pampa</b>	--	--	--	87,3	45,9	1,2,3,4,5,6
<b>Pantanal</b>	8,62 - 243,84	0,56 - 22,42	0,06 - 26,82	87,3	45,9	1,2,3,4,5,6

(a) serapilheira e material combustível lenhoso com até 0,69 cm de diâmetro

(b) material combustível lenhoso com mais de 0,7 cm de diâmetro

1 Kauffman et al., 1994 (Cerrado Típico)

2 Castro & Kauffman, 1998 (Cerrado Típico)

3 Ward et al., 1992 (Cerrado Típico)

4 Schmidt et al., 2016 (Cerrado Típico)

5 Santos et al., 2021 (Cerrado Típico)

6 Sato 2003 (Cerrado Típico)

As emissões derivadas do processo de dinâmica pós-fogo em savanas foram também contabilizadas e adicionadas as emissões por combustão. Para isso foi seguida a metodologia proposta por Gomes et al. (2024). Primeiramente foi gerado um índice de recorrência do fogo combinando dados espaciais de frequência e intervalo entre incêndios. Dentro da série 1986-2023, em cada ano mapeamos pixels de vegetação savânica submetidos a perdas extremas ( $1.9\% \text{ ano}^{-1}$ ) e moderadas ( $0.3\% \text{ ano}^{-1}$ ), e ganho ( $2.1\% \text{ ano}^{-1}$ ) de carbono. A cada ano aplicamos as taxas de perdas e ganho sobre o mapa de biomassa (AGB) da QCN. Por fim, ao somar ganhos e perdas de carbono anualmente obtivemos estimativas líquidas do fluxo de  $\text{CO}_2$  pós fogo em vegetação savânica. Aqui, implementamos uma melhoria em relação à Coleção SEEG 11 MUT - agora à cada passo de tempo, o compartimento de carbono da AGB é atualizado em função das perdas ou ganhos de estoques pós-fogo.

### Cálculo das emissões de queimadas em formações florestais

Para as formações florestais em todos os biomas, foram calculadas as emissões decorrentes do processo de combustão do material combustível superficial e as emissões decorrentes dos processos de dinâmica da vegetação pós fogo seguindo modelo FATE (figura 1). Assim como para as formações savânicas, foram gerados mapas de AGB, CWD e FWD a partir dos mesmos mapas da QCN averiguados e corrigidos. Entretanto, para as florestas, o mapa de CWD considera o estoque de madeira morta com diâmetro  $\geq 10$  cm (Deeming et al., 1977; Brando et al., 2014; MCTI, 2020). Já o mapa de FWD considera o estoque de madeira morta com diâmetro  $< 10$  cm e a serapilheira.

Finalmente, estes mapas foram utilizados juntamente com os mapas anuais de queimadas em formações florestais estáveis e fatores de combustão e emissões coletados na literatura, para gerar as estimativas de emissões imediatas de GEE por combustão. Os estoques de AGB, material combustível e fatores de combustão para formações florestais estão disponíveis na Tabela 3, enquanto os fatores de emissão estão disponíveis na terceira coluna da Tabela 1.

Tabela 3. Valores de biomassa acima do solo, necromassa acima do solo, e fatores de combustão utilizados para as formações florestais de cada bioma brasileiro.

Bioma	Biomassa acima do solo (AGB, Mg ha <sup>-1</sup> )	Necromassa (Mg ha <sup>-1</sup> )		Fator de combustão (%)			Referências
		Fina (FWD) <sup>a</sup>	Grossa (CWD) <sup>b</sup>	FWD	CWD, primeira queima	CWD, segunda queima	
Amazônia	0 - 404,2	0 - 35,74	0 - 37,99	68.3	64.3	82.4	1-3
Caatinga	10.84 - 203,22	0,88 - 22,42	0 - 44,36	98.2 5	71.9	82.4	4
Cerrado	3,92 - 168,76	0,34 - 27,26	0 - 24,82	68.3	62.9	82.4	1-2
Mata Atlântica	1,44 - 282,2	0,32 - 14	1,56 - 7,65	68.3	64.3	82.4	1-3
Pampa	1,44 - 193	5,7 - 7,26	0 - 5,96	68.3	62.9	82.4	1-2
Pantanal	12,44 - 133,38	2,46 - 21,46	0,06 - 14,62	68.3	62.9	82.4	1-2

(a) serapilheira e material combustível lenhoso com até 7,6 cm de diâmetro

(b) material combustível lenhoso com mais de 7,6 cm de diâmetro

1 Paolucci et al. (submetido; floresta estacional perenifólia)

2 Balch et al. 2008 (floresta estacional perenifólia)

3 Withey et al. 2018 (floresta de terra-firme)

4 Kauffman et al.1993 (floresta sazonalmente seca)

Para as formações florestais as emissões decorrentes do processo de combustão do material combustível superficial no ano da queima foram integradas às emissões tardias devido à mortalidade de árvores e posterior decomposição (Vasconcelos et al., 2013; Silva et al., 2020). Neste caso, ambos os processos foram interconectados segundo o modelo diagramado na Figura 1.

No ano da primeira queima, os estoques iniciais de CWD e FWD derivados da QCN foram utilizados para as estimativas das emissões imediatas de GEE (Figura 1-A). Porém, nos anos subsequentes, os estoques de CWD e FWD foram derivados da mortalidade dada em função de um percentual da AGB antes do fogo (Figura 1-B).

A AGB é exponencialmente reduzida com o efeito do fogo chegando a uma perda líquida de até 42% da AGB inicial. Por consequência, há um aumento líquido na necromassa florestal no período que se segue após o fogo (Figura 1B-D). As taxas de redução foram geradas a partir de dados de medições de 43 parcelas permanentes em diferentes regiões da Amazônia (Berenguer et al., 2021; Brando et al., 2019; Pontes-Lopes et al., 2021; Silva et al., 2018; Vasconcelos et al 2013). Nestas parcelas, a biomassa perdida pela mortalidade de árvores foi, em média, maior do que a biomassa recuperada pelo processo de regeneração natural pelo menos até 9 anos após o fogo. Destaca-se que faltam dados de monitoramento de parcelas permanentes em um horizonte de tempo mais longo, porém análises de cronossequências de parcelas indicam que os estoques iniciais de AGB na Amazônia não se recuperaram em pelo menos três décadas após o fogo (Silva et al., 2018).

No modelo de emissões, os estoques de AGB e necromassa foram sempre atualizados para os próximos eventos de queima (Figura 1-C). Desta forma, os dois processos de emissões de GEE foram interconectados, sendo que as emissões tardias foram contabilizadas como o estoque de necromassa remanescente após a combustão, emitido gradativamente para a atmosfera segundo uma taxa de decomposição 19% ao ano (Chambers et al., 1999) e convertido em CO<sub>2</sub> equivalente – multiplicando o estoque de necromassa decomposto (Mg ha<sup>-1</sup>) pelo conteúdo de carbono (x 0,5) e pela razão entre o peso molecular do C e do CO<sub>2</sub> (x 3,67). O cômputo da perda de carbono considerando as taxas de decomposição tornam essas estimativas temporalmente mais acuradas.

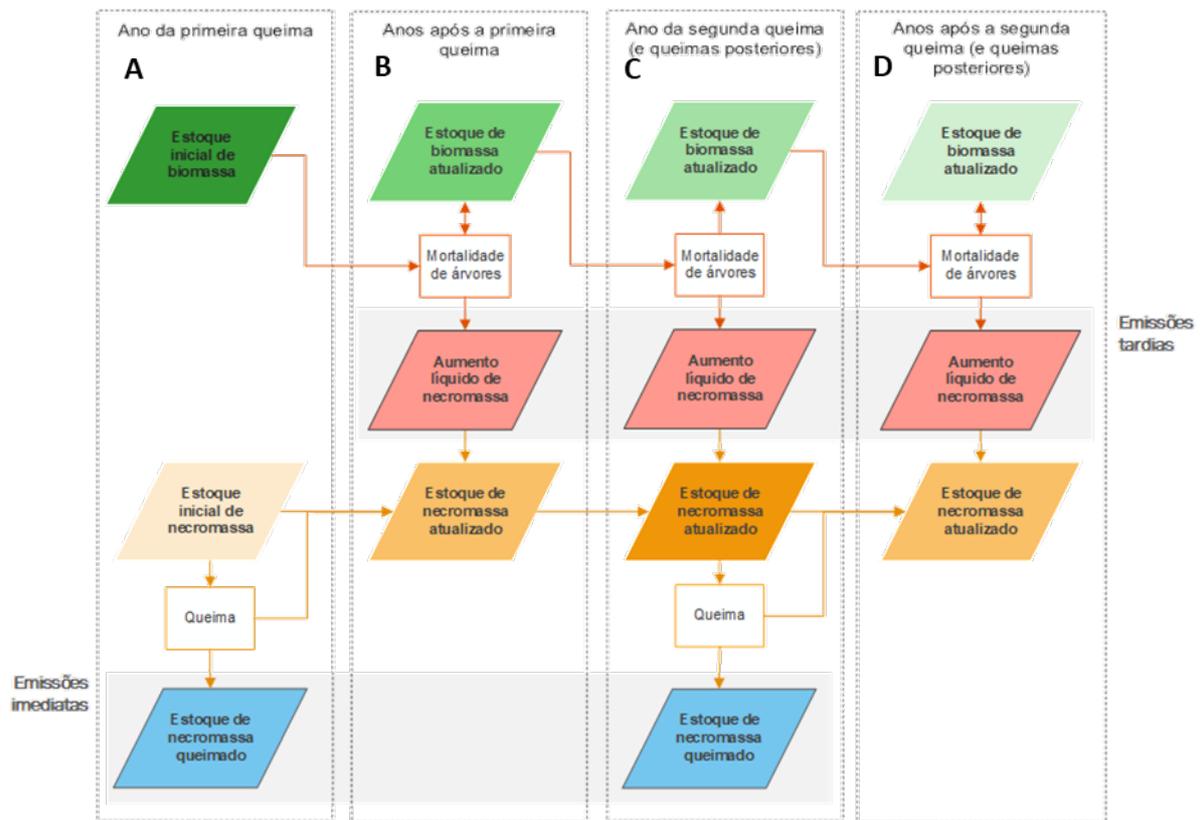


Figura 1. Diagrama simplificado do modelo FATE de emissões que integra emissões por combustão e emissões por mortalidade de árvores em formações florestais. O modelo FATE é uma concepção envolvendo pesquisadores do INPE, Universidade de Lancaster e IPAM e está em fase de submissão para um periódico científico.

# Resultados

## Área de vegetação nativa queimada nos biomas

Segundo o MapBiomas Fogo, no Brasil foram queimados pelo menos uma vez 849.692 km<sup>2</sup>. O Cerrado foi o bioma com maior área queimada ao longo da série temporal de 1985-2020 (733.851 km<sup>2</sup>), seguido pela Amazônia (690.028 km<sup>2</sup>), Caatinga (88.550 km<sup>2</sup>), Pantanal (86.403 km<sup>2</sup>), Mata Atlântica (71.674 km<sup>2</sup>) e Pampa (2.636 km<sup>2</sup>) (Figuras 2-A e 3). De forma geral, as queimadas no Cerrado afetaram principalmente a vegetação savânica (50,1%) e campestre (32,9%), enquanto na Amazônia foram concentradas em pastagens (58,1%), formações campestres (20,3%) e florestais (12,7%) (Figura 2-B). Em ambos os biomas, as áreas queimadas foram concentradas nas bordas, regiões coincidentes com a fronteira agrícola atual, a exemplo da transição Cerrado-Amazônia, conhecida como arco do desflorestamento (van Marle et al., 2017), e da transição Cerrado-Caatinga. No Pantanal (66,9%) e Pampa (56,9%), as queimadas foram concentradas nas formações campestres, enquanto na Caatinga e Mata Atlântica foram em áreas savânicas (76,6%) e pastagens (31,9%), respectivamente (Figura 2-B).

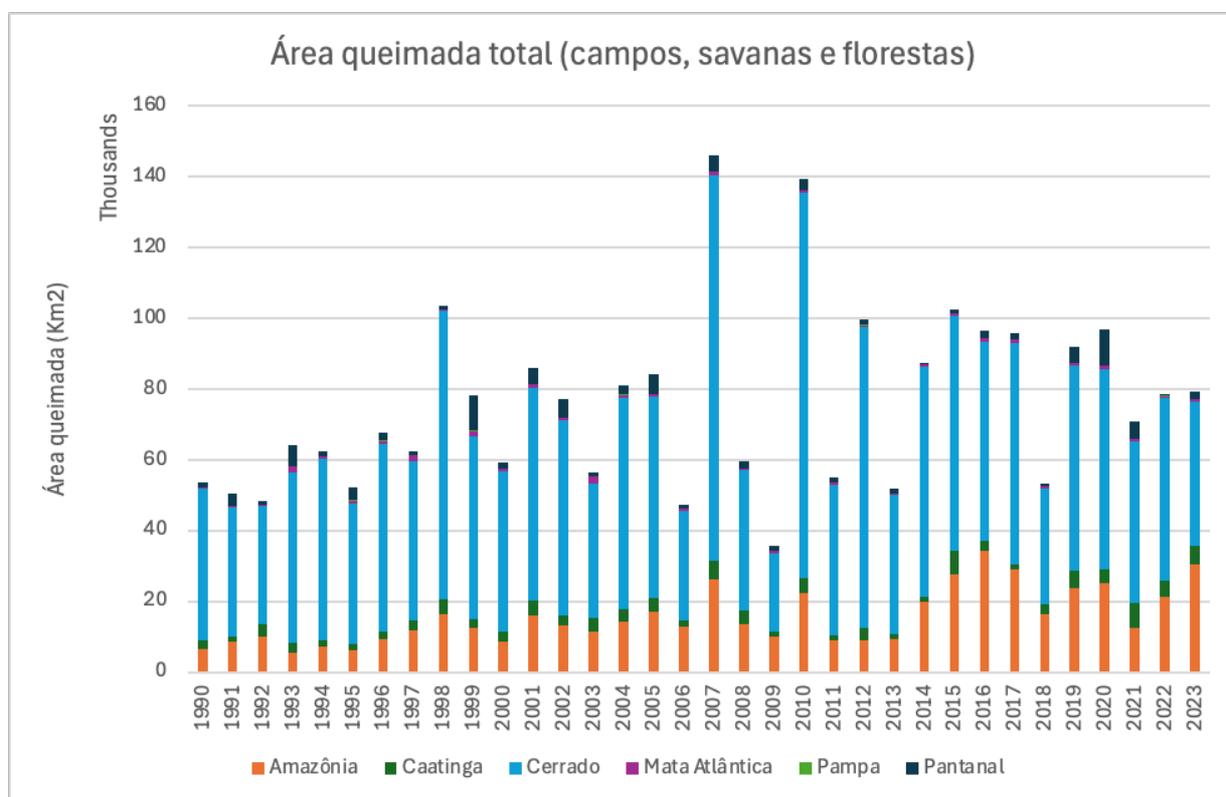


Figura 2. Distribuição temporal (1990-2020) da área queimada (km<sup>2</sup>) nos seis biomas brasileiros. Fonte: MapBiomias Fogo.

Algumas tendências podem ser observadas na área queimada anual entre os biomas. Por exemplo, o aumento gradual de áreas queimadas na Amazônia entre 1985 a 2005, com redução no período de 2006 a 2013, e uma variação difusa caracterizada por aumentos (e.g., 2015 e 2017) e quedas bruscas (e.g., 2018) de 2014 a 2020. Nos biomas Pampa e Pantanal esse aumento foi mais expressivo especialmente a partir de 2011 (Figura 3). Em contrapartida, a área queimada anualmente no Cerrado brasileiro oscilou de 23.943 km<sup>2</sup> (2009) a ~120.000 km<sup>2</sup> (1998) ao longo da série histórica, com uma média geral em torno de 70.000 km<sup>2</sup> (Figura 3).

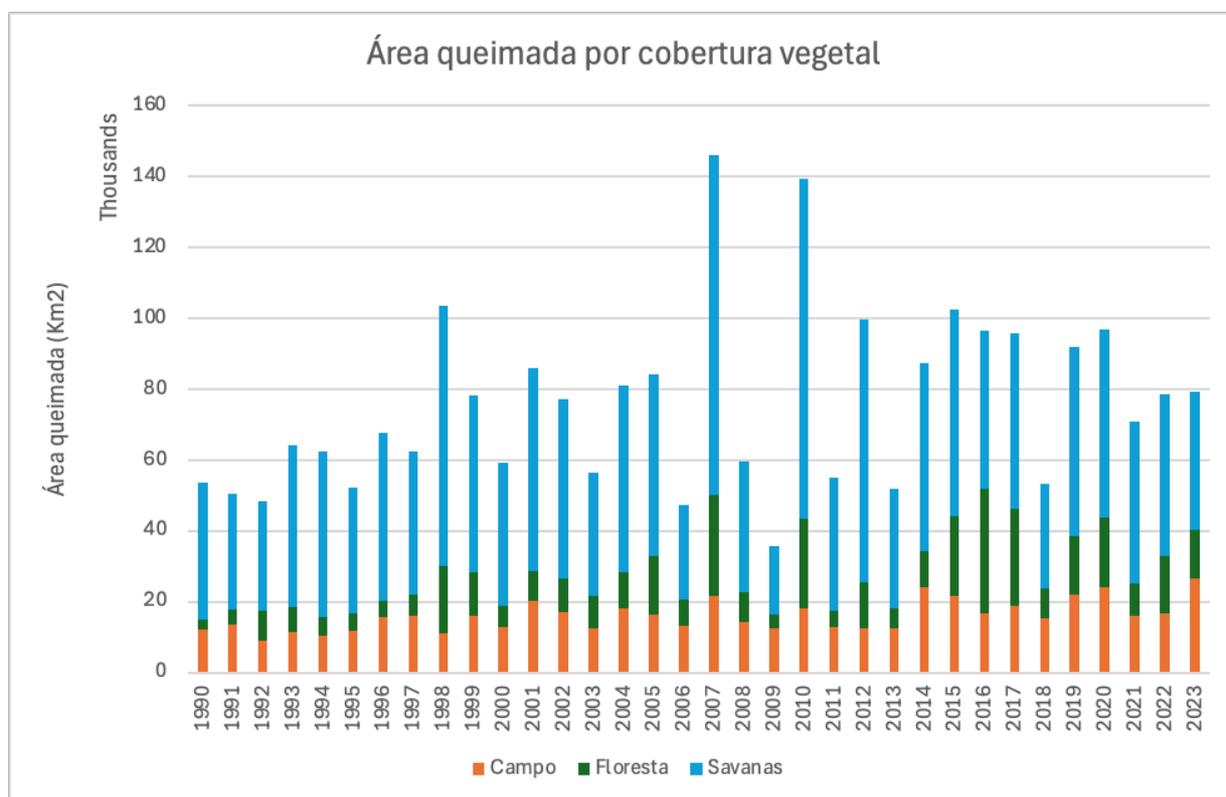


Figura 3. Distribuição temporal (1990-2020) da área queimada (km<sup>2</sup>) por tipo de cobertura de vegetação nativa. Fonte: MapBiomias Fogo.

## Emissões de GEE não associadas a desmatamento

Cerca de 2,5 bilhões de toneladas de CO<sub>2eq</sub> foram emitidos por queimadas não associadas ao desmatamento no Brasil entre 1990 e 2023. A Amazônia foi o bioma que liderou as emissões de GEE com cerca de 1,5 bilhões de toneladas de CO<sub>2eq</sub>, correspondendo a 60% das emissões brasileiras por queimadas. O Cerrado emitiu 823 milhões de toneladas de CO<sub>2eq</sub>, 32% das emissões no período. No Brasil, as maiores emissões de CO<sub>2</sub> foram constatadas em 2010 (127 Mt), 2007 (125 Mt) e 2016 (115 Mt). Os demais biomas, Pantanal, Caatinga, Mata Atlântica e Pampa, concentraram 8% das emissões. Além das emissões imediatas de CO<sub>2</sub>, as emissões de gases não CO<sub>2</sub> durante a combustão são reportadas na sessão de NCI da plataforma SEEG..

Emissões de queimadas não associadas a desmatamento tanto para a Amazônia quanto para o Cerrado tendem a impactar as estimativas de emissões de GEE significativamente. Inclusive devido ao fato de que em grande parte das áreas atingidas por incêndios tem ocorrido em áreas protegidas, o que também impacta a contabilidade de emissões do setor MUT, visto que estas áreas são consideradas como áreas manejadas e, portanto, contribuem com remoções. Por outro lado, após a queima da biomassa da vegetação nativa, futuras remoções do processo de regeneração e incremento da biomassa também devem ser contabilizadas, que dependem da capacidade de regeneração dos diferentes tipos de vegetação nativa e das condições ambientais. Queimadas frequentes também reduzem o incremento e a resiliência da vegetação. Desse modo, o monitoramento do processo de regeneração após o fogo e da transição de uso e cobertura destas áreas também deve ser acompanhado ao longo do período dos inventários nacionais (MCTI, 2015).

## Agradecimentos

O Anexo 2 e os métodos apresentados foram construídos a partir de informações valiosas obtidas junto a pesquisadores nos diferentes biomas brasileiros. Nominalmente, agradecemos à professora Dra. Joice Nunes Ferreira (EMBRAPA), Dra. Erika Berenguer (Oxford University), Dr. Jos Barlow (Lancaster University), Dr. Luiz Aragão (INPE), Dr. Paulo Brando (IPAM) na Amazônia. À Dra. Simone Vieira (UNICAMP), Dr. Daniel Piotto (UFSB), Dr. Fabrício Carvalho (UFJF), Dr. Renato Lima (USP) e Msc. Cândida Leite (INPE) na Mata Atlântica. À Dra. Mercedes Bustamante, Heloisa Miranda (UnB) e Dr. Britaldo Soares-Filho (UFMG) no Cerrado. À Dra. Cátia da Cunha Nunes (UFMT), Dra. Sandra Aparecida Santos (Embrapa Pantanal), Dra. Maria Antônia Carniello (UNEMAT), Dr. Geraldo Damasceno-Junior (UFMS) e Dr. Nilo Sander (UNEMAT) no Pantanal, e ao professor Dr. Marcelo Tabarelli (UFPE) na Caatinga.

## Referências

- Alencar, A., Z. Shimbo, J., Lenti, F., Balzani Marques, C., Zimbres, B., Rosa, M., Arruda, V., Castro, I., Fernandes Márcico Ribeiro, J.P., Varela, V., Alencar, I., Piontekowski, V., Ribeiro, V., M. C. Bustamante, M., Eyji Sano, E., Barroso, M., 2020. Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. *Remote Sens.* 12, 924. <https://doi.org/10.3390/rs12060924>
- Andrade, S.M.A., 1998. Dinâmica do combustível fino e produção primária do estrato rasteiro de áreas de campo sujo de Cerrado submetidas a diferentes regimes de queimas. Dissertação, Universidade de Brasília, Brasília.
- Aragão, L.E.O.C., Anderson, L.O., Fonseca, M.G., Rosan, T.M., Vedovato, L.B., Wagner, F.H., Silva, C.V.J., Silva Junior, C.H.L., Arai, E., Aguiar, A.P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M.N., Domingues, L.G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J.A., Miller, J.B., Phillips, O.L., Saatchi, S., 2018. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nat. Commun.* 9, 536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Baker, T.R., Phillips, O.L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., Erwin, T., Higuchi, N., Killeen, T.J., Laurance, S.G., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Monteagudo, A., Neill, D.A., Núñez Vargas, P., Pitman, N.C.A., Silva, J.N.M., Vásquez Martínez, R., 2004. Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B Biol. Sci.* 359, 353–365. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1422>
- Balch, J.R.K., Nepstad, D.C., Brando, P.M., Curran, L.M., Portela, O., de Carvalho, O., Lefebvre, P., 2008. Negative fire feedback in a transitional forest of southeastern Amazonia. *Glob. Chang. Biol.* 14, 2276–2287. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01655.x>
- Barbosa, R.I., Fearnside, P.M., 2005. Above-ground biomass and the fate of carbon after burning in the savannas of Roraima, Brazilian Amazonia. *For. Ecol. Manage.* 216, 295–316. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.042>
- Barlow, J., Berenguer, E., Carmenta, R., França, F., 2020. Clarifying Amazonia's burning crisis. *Glob. Chang. Biol.* 26, 319–321. <https://doi.org/10.1111/gcb.14872>
- Berenguer, E., Malhi, Y., Brando, P., Cardoso Nunes Cordeiro, A., Ferreira, J., França, F., Chesini Rossi, L., Maria Moraes de Seixas, M., Barlow, J., 2018. Tree growth and stem carbon accumulation in human-modified Amazonian forests following drought and fire. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 373, 20170308. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0308>

Bongers, F., Chazdon, R., Poorter, L., Peña-Claros, M., 2015. The potential of secondary forests. *Science* (80-. ). 348, 642–643. <https://doi.org/10.1126/science.348.6235.642-c>

Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D.C., Morton, D.C., Putz, F.E., Coe, M.T., Silvério, D.V., Macedo, M.N., Davidson, E.A., Nóbrega, C.C., Alencar, A., Soares-Filho, B., 2014. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 6347–6352. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305499111>

Brando, P.M., Paolucci, L., Ummenhofer, C.C., Ordway, E.M., Hartmann, H., Cattau, M.E., Rattis, L., Medjibe, V., Coe, M.T., Balch, J., 2019. Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 47, 555–581. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-082517-010235>

Brienen, R.J.W., Phillips, O.L., Feldpausch, T.R., Gloor, E., Baker, T.R., Lloyd, J., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo-Mendoza, A., Malhi, Y., Lewis, S.L., Vásquez Martínez, R., Alexiades, M., Álvarez Dávila, E., Alvarez-Loayza, P., Andrade, A., Aragão, L.E.O.C., Araujo-Murakami, A., Arets, E.J.M.M., Arroyo, L., Aymard C., G.A., Bánki, O.S., Baraloto, C., Barroso, J., Bonal, D., Boot, R.G.A., Camargo, J.L.C., Castilho, C. V., Chama, V., Chao, K.J., Chave, J., Comiskey, J.A., Cornejo Valverde, F., da Costa, L., de Oliveira, E.A., Di Fiore, A., Erwin, T.L., Fauset, S., Forsthofer, M., Galbraith, D.R., Grahame, E.S., Groot, N., Hérault, B., Higuchi, N., Honorio Coronado, E.N., Keeling, H., Killeen, T.J., Laurance, W.F., Laurance, S., Licona, J., Magnussen, W.E., Marimon, B.S., Marimon-Junior, B.H., Mendoza, C., Neill, D.A., Nogueira, E.M., Núñez, P., Pallqui Camacho, N.C., Parada, A., Pardo-Molina, G., Peacock, J., Peña-Claros, M., Pickavance, G.C., Pitman, N.C.A., Poorter, L., Prieto, A., Quesada, C.A., Ramírez, F., Ramírez-Angulo, H., Restrepo, Z., Roopsind, A., Rudas, A., Salomão, R.P., Schwarz, M., Silva, N., Silva-Espejo, J.E., Silveira, M., Stropp, J., Talbot, J., ter Steege, H., Teran-Aguilar, J., Terborgh, J., Thomas-Caesar, R., Toledo, M., Torello-Raventos, M., Umetsu, R.K., van der Heijden, G.M.F., van der Hout, P., Guimarães Vieira, I.C., Vieira, S.A., Vilanova, E., Vos, V.A., Zagt, R.J., 2015. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519, 344–348. <https://doi.org/10.1038/nature14283>

Brown, J.K., Oberhau, R.D., Johnston, C.M., 1982. Inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. USDA For. Serv. Intermt. For. Range Exp. Station. Gen. Tech. Rep. INT-GTR-129.

Bustamante, M.M.C., Silva, J.S.O., Cantinho, R.Z., Shimbo, J.Z., Oliveira, P.V.C., Santos, M.M.O., Ometto, J.P.H.B., Cruz, M.R., Mello, T.R.B., Godiva, D., Nobre, C.A., 2018. Engagement of scientific community and transparency in C accounting: the Brazilian case for anthropogenic greenhouse gas emissions from land use, land-use change and forestry. *Environ. Res. Lett.* 13, 055005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabb37>

Cardoso, E.L., Crispim, S.M.A., Rodrigues, C.A.G., Barioni Júnior, W., 2003. Efeitos da queima na dinâmica da biomassa aérea de um campo nativo no Pantanal. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 38, 747–752. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2003000600011>

Cardoso, E.L., Crispim, S.M.A., Rodrigues, C.A.G., Barionil Júnior, W., 2000. Biomassa aérea e produção primária do estrato herbáceo em campo de *Elyonurus muticus* submetido à queima anual, no Pantanal. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 35, 1501–1507. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000800001>

Cardozo, F. da S., Coura, S.M. da C., Pereira, G., Shimabukuro, Y.E., Moraes, E.C., 2012. REstimativa do impacto das queimadas e emissão dos gases do efeito estufa no Bioma Pantanal em 2010. An. 4º Simpósio Geotecnologias no Pantanal 657–666.

Castro-Neves, B.M., 2000. Comportamento de queimadas, temperaturas do solo e recuperação da biomassa aérea em campo sujo nativo e em capim gordura (*Melinis minutiflora*). Dissertation, Universidade de Brasília, Brasília.

Castro, E.A., Kauffman, J.B., 1998. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. *J. Trop. Ecol.* 14, 263–283. <https://doi.org/10.1017/S0266467498000212>

Caúla, R.H., Oliveira-Júnior, J.F., Lyra, G.B., Delgado, R.C., Heilbron Filho, P.F.L., 2015. Overview of fire foci causes and locations in Brazil based on meteorological satellite data from 1998 to 2011. *Environ. Earth Sci.* 74, 1497–1508. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4142-z>

Chambers, J.Q., Higuchi, N., Schimel, J.P., Ferreira, L. V., Melack, J.M., 2000. Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. *Oecologia* 122, 380–388. <https://doi.org/10.1007/s004420050044>

Conceição, A., Pivello, V.R., 2011. Biomassa combustível em campo sujo no entorno do Parque Nacional da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. *Biodiversidade Bras.* 2, 146–160.

Fearnside, P.M., 1996. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *For. Ecol. Manage.* 80, 21–34. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03647-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03647-4)

Fidelis, A., Delgado-Cartay, M.D., Blanco, C.C., Müller, S.C., Pillar, V.D., Pfadenhauer, J., 2010. Fire intensity and severity in Brazilian Campos grasslands. *Interciencia* 35, 739–745.

Fonseca, M.G., Anderson, L.O., Arai, E., Shimabukuro, Y.E., Xaud, H.A.M., Xaud, M.R., Madani, N., Wagner, F.H., Aragão, L.E.O.C., 2017. Climatic and anthropogenic drivers of northern

Amazon fires during the 2015-2016 El Niño event. *Ecol. Appl.* 27, 2514–2527. <https://doi.org/10.1002/eap.1628>

Giglio, L., Loboda, T., Roy, D.P., Quayle, B., Justice, C.O., 2009. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sens. Environ.* 113, 408–420. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.006>

Gomes, Letícia et al. Impacts of Fire Frequency on Net CO<sub>2</sub> Emissions in the Cerrado Savanna Vegetation. *Fire*, v. 7, n. 8, p. 280, 2024. <https://doi.org/10.3390/fire7080280>

Gomes, L., Miranda, H.S., Silvério, D. V., Bustamante, M.M.C., 2020a. Effects and behaviour of experimental fires in grasslands, savannas, and forests of the Brazilian Cerrado. *For. Ecol. Manage.* 458, 117804. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117804>

Gomes, L., Miranda, H.S., Soares-Filho, B., Rodrigues, L., Oliveira, U., Bustamante, M.M.C., 2020b. Responses of Plant Biomass in the Brazilian Savanna to Frequent Fires. *Front. For. Glob. Chang.* 3, 507710. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.507710>

Gorgone-Barbosa, E., Pivello, V.R., Bautista, S., Zupo, T., Rissi, M.N., Fidelis, A., 2015. How can an invasive grass affect fire behavior in a tropical savanna? A community and individual plant level approach. *Biol. Invasions* 17, 423–431. <https://doi.org/10.1007/s10530-014-0740-z>

IBGE, 2019. 2019. Mapa de Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil - 1:250 000. IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomas.html?=&t=acesso-ao-produto>. Accessed.

IBGE, 2012. Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2. ed.,.

INPE, 2021. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Projeto Prodes – Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite. Disponível em: [www.obt.inpe.br/prodes](http://www.obt.inpe.br/prodes); Acessado em: outubro de 2021.

IPCC, 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Genebra, Suíça.

IPCC, 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies. Genebra, Suíça..

IPCC, 2003. – Intergovernmental Panel on Climate Change. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Genebra, Suíça.

Kauffman, J.B., Cummings, D.L., Ward, D.E., 1994. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. *J. Ecol.* 82, 519–531. <https://doi.org/10.2307/2261261>

Kauffman, J.B., Sanford, R.L., Cummings, D.L., Salcedo, I.H., Sampaio, E.V.S.B., 1993. Biomass and Nutrient Dynamics Associated with Slash Fires in Neotropical Dry Forests. *Ecology* 74, 140–151. <https://doi.org/10.2307/1939509>

Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Metcalfe, D.B., Paiva, R., Quesada, C.A., Alameida, S., Anderson, L., Brando, P., Chambers, J.Q., Costa, A.C.L., Hutrya, L.R., Oliveira, P., Patino, S., Pyle, E.H., Robertson, A.L., Teixeira, L.M., 2009. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 15, 1255–1274. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01780.x>

Malhi, Y., Doughty, C.E., Goldsmith, G.R., Metcalfe, D.B., Girardin, C.A.J., Marthews, T.R., del Aguila-Pasquel, J., Aragão, L.E.O.C., Araujo-Murakami, A., Brando, P., da Costa, A.C.L., Silva-Espejo, J.E., Farfán Amézquita, F., Galbraith, D.R., Quesada, C.A., Rocha, W., Salinas-Revilla, N., Silvério, D., Meir, P., Phillips, O.L., 2015. The linkages between photosynthesis, productivity, growth and biomass in lowland Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* 21, 2283–2295. <https://doi.org/10.1111/gcb.12859>

Mapbiomas, 2021. Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Disponível em: <http://mapbiomas.org/>; Acessado em: outubro de 2021.

MCTI, 2020. Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

MCTI, 2016. Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

MCTI, 2015. Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação. Relatório de Referência: Setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas. Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatório Técnico. Ministério da C.

Medeiros, M.B., 2002. Efeitos do fogo nos padrões de rebrotamento em plantas lenhosas, em campo sujo, após queimadas prescritas. Thesis, Universidade de Brasília.

Miranda, H.S., Silva, E.R., Miranda, A.C., 1996. Comportamento do fogo em queimadas de campo sujo, in: Miranda, H S, Saito, C.H., Dias, B.F.S. (Eds.), Impactos Das Queimadas Em Áreas de Cerrado e Restinga. ECL / UnB, Brasília, pp. 1-10.

Miranda, S. C., Bustamante, M., Palace, M., Hagen, S., Keller, M., Ferreira, L.G., 2014. Regional variations in biomass distribution in Brazilian Savanna Woodland. *Biotropica* 46, 125-138. <https://doi.org/10.1111/btp.12095>

MMA, 2013. Ministério do Meio Ambiente. Biomas. Disponível em: [www.mma.gov.br/biomas](http://www.mma.gov.br/biomas). Acessado em: 28 de outubro de 2021.

Montenegro, S.R., 2019. Efeitos do manejo do fogo na estrutura de comunidades lenhosas em formações savânicas do Cerrado. Dissertação, Universidade de Brasília.

Nogueira, E.M., Fearnside, P.M., Nelson, B.W., Barbosa, R.I., Keizer, E.W.H., 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *For. Ecol. Manage.* 256, 1853-1867. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.022>

Nunes, E.L., Costa, M.H., Malhado, A.C.M., Dias, L.C.P., Vieira, S.A., Pinto, L.B., Ladle, R.J., 2012. Monitoring carbon assimilation in South America's tropical forests: Model specification and application to the Amazonian droughts of 2005 and 2010. *Remote Sens. Environ.* 117, 449-463. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.022>

Ottmar, R.D., Vihnanek, R.E., Miranda, H.S., Sato, M.N., Andrade, S.M.A., 2001. Séries de estéreo-fotografias para quantificar a biomassa da vegetação do cerrado do Brasil Central. *Floresta, Curitiba*.

Pontes-Lopes, A., Silva, C.V.J., Barlow, J., Rincón, L.M., Campanharo, W.A., Nunes, C.A., de Almeida, C.T., Silva Júnior, C.H.L., Cassol, H.L.G., Dalagnol, R., Stark, S.C., Graça, P.M.L.A., Aragão, L.E.O.C., 2021. Drought-driven wildfire impacts on structure and dynamics in a wet Central Amazonian forest. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 288, 20210094. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0094>

Poorter, L., Bongers, F., Aide, T.M., Almeyda Zambrano, A.M., Balvanera, P., Becknell, J.M., Boukili, V., Brancalion, P.H.S., Broadbent, E.N., Chazdon, R.L., Craven, D., de Almeida-Cortez, J.S., Cabral, G.A.L., de Jong, B.H.J., Denslow, J.S., Dent, D.H., DeWalt, S.J., Dupuy, J.M., Durán, S.M., Espírito-Santo, M.M., Fandino, M.C., César, R.G., Hall, J.S., Hernandez-Stefanoni, J.L., Jakovac, C.C., Junqueira, A.B., Kennard, D., Letcher, S.G., Licona, J.-C.,

Lohbeck, M., Marín-Spiotta, E., Martínez-Ramos, M., Massoca, P., Meave, J.A., Mesquita, R., Mora, F., Muñoz, R., Muscarella, R., Nunes, Y.R.F., Ochoa-Gaona, S., de Oliveira, A.A., Orihuela-Belmonte, E., Peña-Claros, M., Pérez-García, E.A., Piotto, D., Powers, J.S., Rodríguez-Velázquez, J., Romero-Pérez, I.E., Ruiz, J., Saldarriaga, J.G., Sanchez-Azofeifa, A., Schwartz, N.B., Steininger, M.K., Swenson, N.G., Toledo, M., Uriarte, M., van Breugel, M., van der Wal, H., Veloso, M.D.M., Vester, H.F.M., Vicentini, A., Vieira, I.C.G., Bentos, T.V., Williamson, G.B., Rozendaal, D.M.A., 2016. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature* 530, 211–214. <https://doi.org/10.1038/nature16512>

Pott, A., 1982. Pastagens das sub-regiões dos Paiaguás e da Nhecolândia do Pantanal Mato-Grossense. *Curricular Técnica*: Embrapa.

Pozer, C.G., Nogueira, F., 2004. Flooded native pastures of the northern region of the Pantanal of Mato Grosso: biomass and primary productivity variations. *Braz. J. Biol.* 64, 859–866. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842004000500016>

Pyle, E.H., Santoni, G.W., Nascimento, H.E.M., Hutyrá, L.R., Vieira, S., Curran, D.J., van Haren, J., Saleska, S.R., Chow, V.Y., Carmago, P.B., Laurance, W.F., Wofsy, S.C., 2008. Dynamics of carbon, biomass, and structure in two Amazonian forests. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 113, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2007JG000592>

Ribeiro, T. de O., 2010. Quantificação do material combustível superficial em unidade de conservação no semiárido da Paraíba. *Monografia*: Universidade Federal de Campina Grande.

Ribeiro, S.C., Fehrmann, L., Soares, C.P.B., Jacovine, L.A.G., Kleinn, C., de Oliveira Gaspar, R., 2011. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. *For. Ecol. Manage.* 262, 491–49

Rissi, M.N., 2016. Efeito da época da queima na dinâmica de campo sujo de Cerrado. Thesis, Universidade Estadual Paulista.9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.04.017>

Rocha, H.R. da, Freitas, H.C., Rosolem, R., Juárez, R.I.N., Tannus, R.N., Ligo, M.A., Cabral, O.M.R., Dias, M.A.F.S., 2002. Measurements of CO<sub>2</sub> exchange over a woodland savanna (Cerrado *Sensu stricto*) in southeast Brasil. *Biota Neotrop.* 2, 1–11. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032002000100009>

Rodrigues, C.A., Zironi, H.L., Fidelis, A., 2021. Fire frequency affects fire behavior in open savannas of the Cerrado. *For. Ecol. Manage.* 482, 118850. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118850>

Rodrigues, C.A.G., 1999. Efeitos do fogo e da presença animal sobre a biomassa aérea e radicular, nutrientes do solo, composição florística, fenologia e dinâmica de um campo de capim-carona (*Elyonurus Muticus* (Spreng.) O. Ktze.) no pantanal (sub-região de Nhecolândia). Tese: Universidade Estadual de Campinas.

Santos, A.C. dos, Montenegro, S. da R., Ferreira, M.C., Barradas, A.C.S., Schmidt, I.B., 2021. Managing fires in a changing world: Fuel and weather determine fire behavior and safety in the neotropical savannas. *J. Environ. Manage.* 289, 112508. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112508>

Sato, M.N., 2003. Efeito a longo prazo de queimadas prescritas na estrutura de comunidade de lenhosas da vegetação do cerrado sensu stricto. Tese, Universidade de Brasília.

Scaranello M. A., 2010. Dinâmica da comunidade arbórea de floresta ombrófila densa de terras baixas e de restinga no Parque Estadual da Serra do Mar, SP. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Ciências, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Schmidt, I.B., Fonseca, C.B., Ferreira, M., Sato, M.N., 2016. Implementação do programa piloto de Manejo Integrado do Fogo em três Unidades de Conservação do Cerrado. *Biodiversidade Bras.* 6, 55–70.

Seger, C.D., Batista, A.C., Tetto, A.F., Soares, R.V., 2013. Comportamento Do Fogo Em Queimas Controladas De Vegetação De Estepe No Município De Palmeira, Paraná, Brasil. *Floresta* 43, 557. <https://doi.org/10.5380/ufpr.v43i4.31385>

Silva, C.V.J., Aragão, L.E.O.C., Barlow, J., Espírito-Santo, F., Young, P.J., Anderson, L.O., Berenguer, E., Brasil, I., Foster Brown, I., Castro, B., Farias, R., Ferreira, J., França, F., Graça, P.M.L.A., Kirsten, L., Lopes, A.P., Salimon, C., Scaranello, M.A., Seixas, M., Souza, F.C., Xaud, H.A.M., 2018. Drought-induced Amazonian wildfires instigate a decadal-scale disruption of forest carbon dynamics. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 373, 20180043. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0043>

Silva, C.V.J., Aragão, L.E.O.C., Young, P.J., Espírito-Santo, F., Berenguer, E., Anderson, L.O., Brasil, I., Pontes-Lopes, A., Ferreira, J., Withey, K., França, F., Graça, P.M.L.A., Kirsten, L., Xaud, H., Salimon, C., Scaranello, M.A., Castro, B., Seixas, M., Farias, R., Barlow, J., 2020. Estimating the multi-decadal carbon deficit of burned Amazonian forests. *Environ. Res. Lett.* 15, 114023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abb62c>

Silva, E.R., 1999. Efeito do regime de queima na taxa de mortalidade e estrutura da vegetação lenhosa de campo sujo de Cerrado. Dissertation, Universidade de Brasília.

Silva Junior, C.H.L., Aragão, L.E.O.C., Anderson, L.O., Fonseca, M.G., Shimabukuro, Y.E., Vancutsem, C., Achard, F., Beuchle, R., Numata, I., Silva, C.A., Maeda, E.E., Longo, M., Saatchi, S.S., 2020. Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. *Sci. Adv.* 6. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz8360>

Silva Junior, C.H.L., Carvalho, N.S., Pessôa, A.C.M., Reis, J.B.C., Pontes-Lopes, A., Doblas, J., Heinrich, V., Campanharo, W., Alencar, A., Silva, C., Lapola, D.M., Armenteras, D., Matricardi, E.A.T., Berenguer, E., Cassol, H., Numata, I., House, J., Ferreira, J., Barlow, J., Gatti, L., Brando, P., Fearnside, P.M., Saatchi, S., Silva, S., Sitch, S., Aguiar, A.P., Silva, C.A., Vancutsem, C., Achard, F., Beuchle, R., Shimabukuro, Y.E., Anderson, L.O., Aragão, L.E.O.C., 2021. Amazonian forest degradation must be incorporated into the COP26 agenda. *Nat. Geosci.* 14, 634–635. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00823-z>

Vasconcelos, S.S. de, Fearnside, P.M., Graça, P.M.L. de A., Nogueira, E.M., Oliveira, L.C. de, Figueiredo, E.O., 2013. Forest fires in southwestern Brazilian Amazonia: Estimates of area and potential carbon emissions. *For. Ecol. Manage.* 291, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.044>

Vieira, S., de Camargo, P.B., Selhorst, D., da Silva, R., Hutyrá, L., Chambers, J.Q., Brown, I.F., Higuchi, N., dos Santos, J., Wofsy, S.C., Trumbore, S.E., Martinelli, L.A., 2004. Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests. *Oecologia* 140, 468–479. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1598-z>

Ward, D.E., Susott, R.A., Kauffman, J.B., Babbitt, R.E., Cummings, D.L., Dias, B., Holben, B.N., Kauffman, Y.J., Rasmussen, R.A., Setzer, A.W., 1992. Smoke and Fire Characteristics for Cerrado and Deforestation Burns in Brazil: BASE-B Experiment. *J. Geophys. Res.* 97, 14601–14619.

Withey, K., Berenguer, E., Palmeira, A.F., Espírito-Santo, F.D.B., Lennox, G.D., Silva, C.V.J., Aragão, L.E.O.C., Ferreira, J., França, F., Malhi, Y., Rossi, L.C., Barlow, J., 2018. Quantifying immediate carbon emissions from El Niño-mediated wildfires in humid tropical forests. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 373, 20170312. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0312>

White, B.L.A., de Oliveira, M.V.N., Ribeiro, G.T., 2017. Avaliação e simulação do comportamento do fogo em diferentes fitofisionomias de uma área de Mata Atlântica do Nordeste Brasileiro. *Floresta* 47, 247–256. <https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.50844>

Wright, J.S., 2013. The carbon sink in intact tropical forests. *Glob. Chang. Biol.* 19, 337–339. <https://doi.org/10.1111/gcb.12052>

## Anexo 2 - Tipos de transição contabilizados no SEEG 12 e as equações associadas para cálculo das emissões e remoções

**Tabela 1.** Equações propostas pelo IPCC (2003), e adotadas pela Quarta Comunicação Nacional (MCTI 2020) e pelo SEEG para calcular as emissões e remoções associadas a cada tipo de transição de cobertura e uso da terra, entre um ano (t1) e o próximo (t2). Nas equações: A = área da transição; Ci = incremento anual de estoque de carbono; Ct1 = estoque de carbono antes da transição; Ct2 = estoque de carbono depois da transição; Cit2 = incremento de estoque em um ano na classe final após a transição. O termo (44/12) é o fator aplicado para transformar de estoque de carbono (tonelada de C) em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Classes são as classes consideradas pelo IPCC e pelo MCTI: FM = floresta manejada (no interior de áreas protegidas); GM = campo manejado; FSec = floresta secundária; GSec = campo secundário; Ac = área agrícola; Ap = pastagem; Ref = silvicultura; O = outros tipos de uso da terra.

<b>Categoria</b>	<b>Class e (t1)</b>	<b>Class e (t2)</b>	<b>Equação</b>	<b>Tipo de equação</b>
Remoções em áreas protegidas	FM	FM	$A*(Ci)*(44/12)$	Incrementos e perdas (anual)
Remoções em áreas protegidas	GM	GM	$A*(Ci)*(44/12)$	Incrementos e perdas (anual)
Remoções por vegetação secundária	FSec	FSec	$A*(Ci)*(44/12)$	Incrementos e perdas (anual)
Remoções por vegetação secundária	GSec	GSec	$A*(Ci)*(44/12)$	Incrementos e perdas (anual)
Remoções por vegetação secundária	O	FSec	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por vegetação secundária	O	GSec	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação

Alterações de uso da terra	FSec	Ac	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	FSec	Ap	$A*(Ct1*0.44-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	FSec	O	$A*(Ct1*0.44-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	FSec	Ref	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	GSec	Ac	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	GSec	Ap	$A*(Ct1*0.44-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	GSec	O	$A*(Ct1*0.44-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	Ac	Ap	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	Ac	FSec	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ac	GSec	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ac	O	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	Ac	Ref	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ap	Ac	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ap	FSec	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ap	GSec	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ap	O	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	FM	Ac	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	FM	Ap	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	FM	O	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque

Alterações de uso da terra	FM	Ref	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	FNM	Ac	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	FNM	Ap	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	FNM	O	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	FNM	Ref	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	GM	Ac	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	GM	Ap	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	GM	O	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	GM	Ref	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	GNM	Ac	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	GNM	Ap	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	GNM	O	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	GNM	Ref	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ref	Ac	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ref	Ap	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Alterações de uso da terra	Ref	FSec	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ref	GSec	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Combinação
Alterações de uso da terra	Ref	O	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	Ac	Ap	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque

Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	Ac	FSec	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	Ac	Ref	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	Ap	Ac	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	Ap	Ref	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	FSec	Ref	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	GM	Ref	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	GNM	Ref	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	GSec	Ac	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	GSec	Ap	$A*(Ct1*0.44-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	GSec	Ref	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	O	Ac	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	O	Ap	$A*(Ct1-Ct2)*(44/12)$	Duas medições de estoque
Remoções por outros tipos de mudança de uso da terra	O	Ref	$A*(Ct1-Cit2)*(44/12)$	Combinação

