

Monitoramento oficial da vegetação nativa brasileira por imagens de satélite: o programa BiomassBR e os sistemas Prodes, Deter e TerraClass

Cláudio Aparecido de Almeida, Letícia Palazzi Perez, Mariane Souza Reis, Vagner Luis Camilotti, Cassiano Gustavo Messias, Erison Carlos dos Santos Monteiro, Taise Farias Pinheiro, João Felipe Sobrinho Kneipp Cerqueira Pinto, Luciana de Souza Soler, Lúbia Vinhas, Luiz Eduardo Pinheiro Maurano, Marcos Adami, Tatiana Mora Kuplich, Igor da Silva Narvaes, Gustavo F. Balué Arcoverde e Silvana Amaral

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Resumo

O governo brasileiro possui três sistemas oficiais de monitoramento por satélite da supressão da vegetação nativa dos biomas brasileiros, concebidos e executados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio do Programa de Monitoramento dos Biomas Brasileiros (BiomassBR): 1) o Prodes – Monitoramento Anual da Supressão de Vegetação Nativa; 2) o Deter – Monitoramento Diário da Supressão e Degradação de Vegetação Nativa; e 3) o TerraClass – Monitoramento Sistemático da Cobertura e Uso da Terra, este em colaboração com a Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA). Neste artigo são apresentadas as principais características de cada um destes sistemas, os resultados mais recentes do monitoramento da vegetação nativa brasileira, as principais políticas públicas baseadas no BiomassBR e o papel do programa no cumprimento dos compromissos climáticos internacionais assumidos pelo país.

Abstract

The Brazilian government has three official satellite monitoring systems for monitoring native vegetation loss in its six biomes, designed and executed by the National Institute for Space Research, through the Brazilian Biomes Monitoring Program (BiomassBR): 1) Prodes - Annual Monitoring of Native Vegetation Suppression; 2) Deter - Daily Monitoring of Suppression and Degradation of Native Vegetation; and 3) TerraClass - Systematic Monitoring of Land Cover and Use. This article presents the main characteristics of each of these systems, the most recent results of Brazilian native vegetation monitoring, the main public policies based on BiomassBR, and the role of the program as a tool for achieving goals within international climate agreements

Palavras-chave: BiomassBR, Prodes, Deter, TerraClass, desmatamento, mudanças climáticas

Keywords: BiomassBR, Prodes, Deter, TerraClass, deforestation, climate change

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47411](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47411)

1 Introdução

Mudanças no uso e cobertura da terra estão entre as ações antrópicas mais antigas e abrangentes [1] sobre a superfície do planeta. Os termos uso e cobertura da terra possuem significados diferentes. Cobertura da terra se refere diretamente aos elementos presentes na superfície terrestre, como, por exemplo, a quantidade e o tipo

de cobertura vegetal, água, estruturas naturais ou construídas. Por sua vez, uso da terra denota o propósito de utilização da terra, considerando os interesses humanos [2]. Por exemplo, uma área cuja cobertura da terra é “floresta” destinada à preservação teria como uso da terra “área de proteção ambiental”. A mesma área, caso destinada para extração seletiva de madeira, poderia ter o uso “extração madeireira”. Um tipo de cobertura

pode ter vários tipos de usos simultâneos, e mudanças na cobertura da terra podem ou não estar associadas às mudanças de uso, e vice-versa.

Quando as mudanças de uso ou cobertura alteram sensivelmente a superfície terrestre, é possível detectar e categorizar essas mudanças a partir de imagens coletadas por sensores a bordo de diferentes plataformas, como veículos aéreos não-tripulados, aviões e satélites orbitais. Ou seja, a partir de imagens é possível detectar diretamente informações sobre a cobertura da terra, mas não necessariamente de uso. A identificação do uso se dá por inferências acerca da cobertura e/ou com a utilização de dados auxiliares, como informações de campo, por exemplo. No Brasil, umas das alterações de cobertura da terra mais importantes é a supressão da vegetação nativa, isto é, a remoção da vegetação original de uma dada área. Quando essa vegetação é do tipo floresta, adotam-se os termos desmatamento ou desflorestamento.

Dadas as dimensões continentais do Brasil, as taxas elevadas de supressão da vegetação nativa, historicamente registradas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), podem impactar negativamente a biodiversidade e diversos processos ambientais, tais como a produção primária e o funcionamento de ciclos biogeoquímicos, como de água e de carbono, em escalas locais, regionais e globais [1,3]. A remoção da vegetação nativa tem influência também no sistema climático, uma vez que pode alterar a composição da atmosfera, o albedo da superfície (fração da energia solar refletida pela superfície terrestre) e as fontes e os sumidouros de gases do efeito estufa [4].

A diminuição e o controle da supressão de vegetação nativa dependem de informações provenientes de sistemas de monitoramento. Tratam-se de conjuntos de metodologias e dados necessários para informar sobre a cobertura da terra de forma consistente e periódica.

O governo brasileiro possui três sistemas de monitoramento oficiais concebidos e executados pelo INPE, por meio do Programa de Monitoramento dos Biomas Brasileiros (BiombrasBR): 1) o Prodes – Monitoramento Anual da Supressão de Vegetação Nativa; 2) o Deter – Monitoramento Diário da Supressão e Degradação de Vegetação Nativa; e 3) o TerraClass – Monitoramento Sistemático da Cobertura e Uso da Terra, esse exe-

cutado em parceria com a Empresa Brasileira de Agropecuária (Embrapa). Juntos, esses sistemas objetivam fornecer, ao governo federal brasileiro, informações sistemáticas sobre a supressão da vegetação nativa em todos os biomas brasileiros, incluindo a supressão causada por queimadas e/ou processos de degradação florestal nos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal. O presente artigo tem por objetivo apresentar de forma sintética e objetiva o funcionamento e os principais resultados desses sistemas de monitoramento.

2 O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e o programa BiombrasBR

Como signatário do Acordo de Paris, o Brasil se comprometeu a cumprir metas de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, instituídas nas chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) que, de forma muito simplificada, são o cálculo da contribuição de cada país nas emissões de GEE, considerando todas as fontes de emissões e todas as fontes de sumidouros de GEE [5]. Assim, a proteção da vegetação nativa brasileira é parte fundamental das NDC, que inclui atingir a meta de emissões líquidas zero até 2050 [6].

A exemplo, a Amazônia, que tem 60% de sua extensão em território brasileiro, é responsável por 50% dos estoques de carbono do planeta [7], apesar das incertezas relacionadas ao tema [8]. No entanto, diversos eventos, extremados pela própria crise climática e pelo desmatamento [9] comprometem a capacidade da floresta em desempenhar o papel essencial de armazenar carbono.

Dentro da Política Nacional sobre Mudança do Clima [10] e por meio do Decreto 10.144/2019, foram aprimorados os Planos de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento (PPCD) da Amazônia (PPCDam), expandido para o Cerrado (PPCDCerrado), com expansão prevista para os demais biomas. Os PPCDs são estruturados em 4 eixos, sendo eles: (i) atividades produtivas sustentáveis; (ii) monitoramento e controle ambiental; (iii) ordenamento fundiário e territorial; e (iv) instrumentos normativos e econômicos voltados à redução do desmatamento e à efetivação das ações abrangidas pelos demais eixos [11]. O eixo (ii) é baseado nos dados do BiombrasBR.

Tabela 1: Características do Sistema Prodes do BiomasBR

Sistema	Abrangência	Satélite (resolução)	Frequência, datas	Área mínima mapeamento	Classes de mapeamento	Referências
Prodes	Amazônia	Até 2023 LANDSAT (30m); a partir de 2024 MSI/Sentinel- 2 (10m)	Taxa anual desde 1988 (Amazônia Legal)	1 ha. Apenas os polígonos maiores que 6,25 ha são contabilizados na taxa de desmatamento	Supressão por corte raso e por degradação progressiva (a partir de 2022 as classes passaram a ser diferenciadas para divulgação)	[16]
	Cerrado	Até 2023 Landsat (30m); a partir de 2024 Sentinel (10m)	A série histórica começa em 2001. Porém, o incremento foi inicialmente mapeado de forma bienioal ou quadrienal, o que varia conforme a metodologia adotada por cada bioma.	1 ha	Supressão da vegetação nativa	[13, 17-20]
	Pampa, Pantanal, Caatinga, Mata Atlântica	Até 2022 Landsat (30m); a partir de 2023 Sentinel (20m)	Desde 2019, o incremento é anual para todos os biomas (exceto para o bioma Cerrado, cujo incremento anual iniciou em 2013)			
	Áreas Não Florestais da Amazônia (NF)	Até 2014 Landsat (30m); a partir de 2016 Sentinel (20m)				

Além do acompanhamento dos PPCDs, o principal uso dos dados do Programa BiomasBR se dá na fiscalização e controle do desmatamento pelo IBAMA, Polícia Federal, Ministério da Justiça e governos estaduais e municipais. Além disso, os dados do BiomasBR são utilizados no rastreamento de *commodities*¹ e na sua certificação de origem de áreas sem desmatamento recente ou pretérito, em especial para atender legislações, como as do Mercado comum da União Europeia. Estes dados também são utilizados no acompanhamento das mudanças da cobertura da terra e uso da terra pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Neste contexto, o programa BiomasBR é chave para o cumprimento das NDC brasileiras e contribuir para a mitigação do impacto dos GEE em es-

cala planetária, pois ele é o principal mecanismo institucional que mede a remoção da vegetação nativa no Brasil.

3 Sistemas BiomasBR

3.1 Prodes: monitoramento anual da supressão de vegetação nativa

No final dos anos 1980, foi criado o primeiro projeto de monitoramento sistemático de desmatamento no Brasil, o Prodes, com o objetivo de mapear e divulgar, anualmente, a área desmatada na Amazônia Legal Brasileira. Em 2016, a metodologia Prodes foi adaptada para monitorar também a perda de vegetação natural no bioma Cerrado [12, 13] e, através de projeto financiado pelo Fundo Amazônia, o INPE, em parceria com a Fundação de Ciências, Aplicações e Tecnologia Espaciais - FUNCATE, gerou mapas base para o ano de 2000 e uma série histórica de incrementos anuais entre 2001 e 2022, publicados em forma

¹ *Commodities* são mercadorias originárias do setor primário e de baixo valor agregado, ou seja, em seu estado bruto ou pouco modificadas. Alguns exemplos são soja, minério de ferro e petróleo.

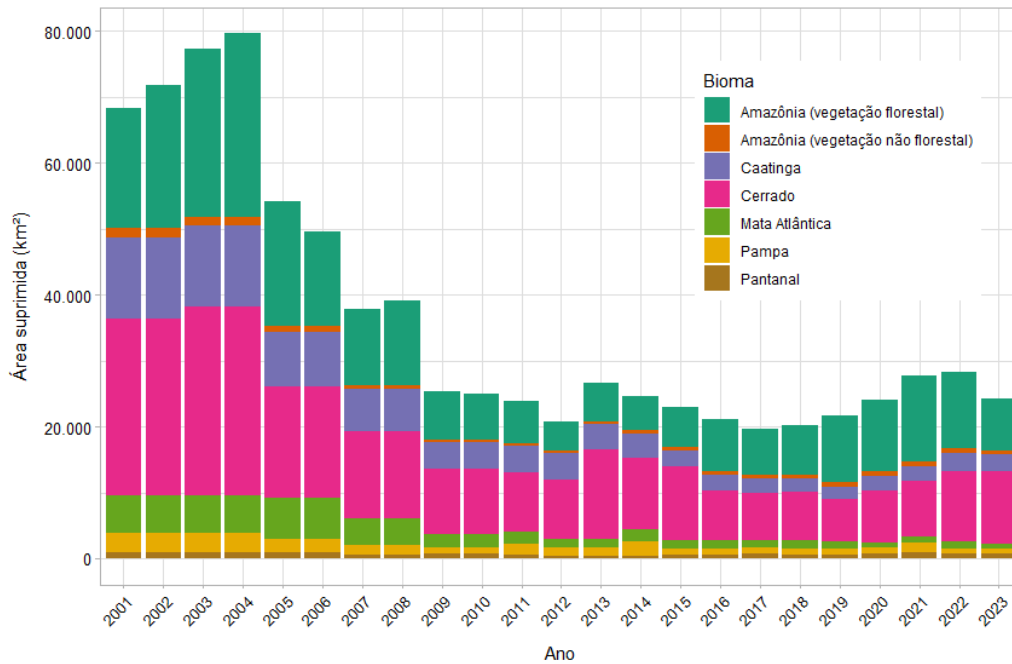


Figura 1: Supressão da vegetação nativa por bioma detectada pelo Prodes de 2001 a 2023

de mapas de desmatamento para os biomas Mata Atlântica, Caatinga, Pampa e Pantanal. Em 2023 o INPE assumiu de forma exclusiva a continuidade deste mapeamento anual para estes 4 novos biomas.

Em 2023, o mapeamento da vegetação não florestal da Amazônia (savanas, campinas e campinaranas, campos gerais e vegetação pioneira de várzeas), até então não monitorada, teve sua série histórica gerada com a criação do Prodes Amazônia Não Floresta (Prodes NF) [14]. Atualmente, os sistemas Prodes nos diferentes biomas configuram o Prodes Brasil.

O mapeamento da supressão é feito com base na interpretação visual de imagens de satélite. Na fronteira do conhecimento, desde os anos 2010, o INPE tem se dedicado também à pesquisa e à inclusão de técnicas de inteligência artificial para auxiliar na detecção de eventos de supressão da vegetação nativa, a fim de automatizar ainda mais a geração dos dados pelos projetos [15]. As principais características para cada bioma e referências contendo os detalhes metodológicos estão sintetizadas na Tabela 1.

3.1.1 Resultados do Prodes

Os resultados do Prodes consistem em mapas e valores de área de supressão de vegetação nativa

para diferentes recortes espaciais (biomas, estados, municípios, Unidades de Conservação, Terras Indígenas). Esses dados são publicamente divulgados e estão acessíveis a partir na plataforma web TerraBrasilis. Dados recentes indicam que a área total de perda de vegetação nativa para o Brasil, até o ano de 2023, foi de 3.129.462,88 km², ou 36,77% da área do território nacional.

A Figura 1 ilustra a área da vegetação nativa suprimida detectada pelo Prodes de 2001 a 2023 para todos os biomas brasileiros. Entre 2001 e 2004, observa-se que ocorreu um aumento da supressão da vegetação nativa em todo o país. A partir de 2005, essa tendência se inverteu, com valores de área de supressão decrescendo de forma praticamente constante.

Em 2012, foi registrado o menor valor de desmatamento (termo aqui utilizado como sinônimo de supressão da vegetação nativa) da série histórica até aquele momento. Em 2013, houve novo aumento das áreas de supressão, seguido por reduções sucessivas até 2017, quando alcançou valor menor que o verificado em 2012. Entre 2018 e 2022, o desmatamento cresceu novamente, e em 2023, apresentou nova queda. A Tabela 2 sintetiza os resultados Prodes, entre 2001 e 2023, para cada bioma.

Tabela 2: Síntese dos resultados Prodes, entre 2001 e 2023 para cada bioma e as principais condicionantes para a supressão da vegetação nativa.

Bioma	Supressão da vegetação nativa
Mata Atlântica Supressão: 790.364,17 km ² (71,37 % do bioma, 9,29 % do Brasil)	A exploração inicial do território brasileiro concentrou-se na Mata Atlântica, a região mais antropizada até meados do século XX. Ciclos econômicos como o pau-brasil, cana-de-açúcar e café contribuíram significativamente para a perda de vegetação natural [21]. Atualmente, a vegetação nativa é convertida principalmente em pastagens, agricultura, silvicultura, infraestrutura, mineração e áreas urbanas [22].
Pampa Supressão: 114.164,65 km ² (58,90 % do bioma, 1,34 % do Brasil)	No bioma Pampa, a vegetação de campos, muito utilizada na criação extensiva de gado, nas últimas décadas passou a ser composta também por agricultura de grãos, predominantemente soja e arroz, ditada pela oscilação do preço destas <i>commodities</i> no mercado internacional, se estabelecendo como o principal fator de supressão da vegetação nativa [20].
Cerrado Supressão: 1.017.161,26 km ² (51,29 % do bioma, 11,95 % do Brasil)	O povoamento do bioma Cerrado pelos europeus ocorreu após a descoberta do ouro em Minas Gerais e Goiás, no final do século XVII [23], e este é atualmente um dos biomas mais ameaçados no Brasil [24]. Nos últimos 40 anos, o modelo de produção agrícola do Cerrado se consolidou com base no latifúndio e no uso de modernas tecnologias [25], progressivamente transformando o bioma em áreas de pastagens e monoculturas [26].
Caatinga Supressão: 370.764,05 km ² (42,97 % do bioma, 4,36 % do Brasil)	Na Caatinga, a antropização está relacionada principalmente com a expansão da agricultura e de áreas de pastagem. Desde 2010, a expansão de projetos de energia solar e eólica de grande escala também atua como um fator de supressão da vegetação nativa [27].
Pantanal Supressão: 30.393,6 km ² (20,13 % do bioma, 0,36 % do Brasil)	No Pantanal, apesar da grande parte do gado utilizar a pastagem nativa como alimento, fazendeiros têm removido diferentes tipos de vegetação natural para inserir pastagens plantadas [28].
Amazônia Supressão: 776.802,80 km ² (19,75 % do bioma, 9,13 % do Brasil) Amazônia NF Supressão: 29.812,31 km ² (10,65 % do bioma, 0,35 % do Brasil)	A vegetação do bioma Amazônia foi pouco antropizada até a década de 1970, porém, fatores como políticas desenvolvimentistas, ampliação das estradas, incentivos fiscais para a ocupação da região Norte do país a partir da exploração das riquezas naturais, e a ampliação das áreas de soja e de pastagens intensificaram o processo de degradação dos recursos naturais no bioma, inclusive nas áreas não florestais [14, 29].

3.1.2 Políticas públicas baseadas em dados Prodes

Os dados resultantes do Prodes têm sido utilizados, desde os anos 1990, pelo governo federal, para estabelecer políticas públicas de controle e combate ao desmatamento [16] e são essenciais para definir estratégias relacionadas às mudanças climáticas.

A partir dos resultados do Prodes, o governo federal brasileiro estabelece anualmente a lista de municípios prioritários para a alocação de recursos de combate e prevenção ao desmatamento nos níveis estaduais e municipais [30]. Para estes municípios, são oferecidos apoios técnicos e políticas públicas para a redução do desmatamento, a recuperação dos ecossistemas, além de incentivos a investimentos em economias florestais sustentáveis, de baixa emissão de carbono.

Os dados Prodes são utilizados também para o rastreamento e regularização de *commodities* (produtos agrícolas produzidos em larga escala e

destinados ao comércio exterior), como os acordos conhecidos como Moratória da Soja e Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) da carne. Estes são pactos ambientais que passaram a restringir a venda de soja e de carne produzidas em áreas desmatadas, em discordância com o Código Florestal brasileiro [31, 32]. A União Europeia, por exemplo, não permite a compra de produtos agrícolas produzidos em áreas desmatadas após 31/12/2020.

3.2 Deter: monitoramento diário da supressão e degradação de vegetação nativa

O sistema Deter é responsável por monitorar a vegetação nativa dos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal, de forma periódica e em intervalos de tempo os mais curtos possíveis após a aquisição das imagens.

Esse sistema utiliza imagens diárias obtidas com alta-frequência para emitir alertas de supres-

Tabela 3: Características do Sistema Deter do BiomasBR.

Sistema	Abraçgência	Satélite (resolução)	Período de operação	Área mínima Mapeamento	Classes de mapeamento	Referências
Deter MODIS (original)	Amazônia Legal Brasileira	MODIS/ TERRA (250 m) e WFI/CBERS-2B (250 m).	2004-2015	25 ha	Supressão e degradação, sem separação de classes	[35]
Deter Amazônia (ou Deter-B)	Florestas da Amazônia Legal Brasileira	WFI/CBERS-4 (64 m), WFI/4A (64 m), WFI/Amazônia-1 (64 m), AWiFS/IRS-R2 (56 m)	2015-atual	3 ha	Diferencia tipos de supressão e degradação	[16]
Deter Cerrado	Bioma Cerrado		2017-atual	3 ha	Supressão	[36]
Deter Pantanal	Bioma Pantanal		2023-atual	3 ha	Diferencia tipos de supressão e degradação	https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/report/pantanal/
Deter Não-Floresta	Vegetação natural não-florestal do Bioma Amazônia		2023-atual	3 ha	Diferencia tipos de supressão e degradação	[34]
Deter Intenso	Áreas florestais prioritárias na Amazônia Legal Brasileira	WFI/CBERS-4 (64 m), MUX/CBERS-4, OLI/Landsat8 (30 m) e MSI/Sentinel-2 (20 m)	2019-2023	1 ha	Diferenciava tipos de supressão e degradação	[37]
Deter-Radar	Áreas florestais do bioma Amazônia	Sentinel-1 (5 m por 20 m, modo IW)	2021-2024	1 ha (Coleção 1) 0,4 ha (Coleção 2)	Supressão	[38]
Deter-RT			previsto para 2025	0,4 ha	Supressão	[39]

são e degradação da cobertura florestal para agências responsáveis pela fiscalização, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e Secretarias Estaduais do Meio Ambiente.

O Deter foi lançado em 2004, como instrumento para auxiliar nas estratégias de redução e controle de desmatamento propostas pelo PPCDAm. Inicialmente, o sistema se limitava à detecção de desmatamentos nas florestas da Amazônia Legal Brasileira. O Deter foi ampliado para monitorar outras regiões do Brasil, usando novas técnicas e tipos de imagens. Atualmente, o Deter monitora a supressão e a degradação da vegetação do bioma Amazônia, incluindo áreas de vegetação natural não-florestal, Cerrado e Panta-

nal (veja Refs. [33, 34]).

Para a Amazônia foram estabelecidos alguns sistemas dedicados, como por exemplo, o Deter Intenso e o Deter-Radar. E novos sistemas são previstos, como o Deter-RT que deverá ser uma versão aprimorada do Deter-Radar. Os sistemas Deter Amazônia, Cerrado e Pantanal são baseados em interpretação visual de imagens de satélites de resolução mediana, mas com elevada taxa de revisita. O Deter-R e Deter-RT diferem dos anteriores, uma vez que se baseiam em métodos automáticos de detecção de desmatamento em imagens de radar.

Diariamente, novas imagens são processadas e analisadas por uma equipe de intérpretes altamente qualificada, auditadas e distribuídas para

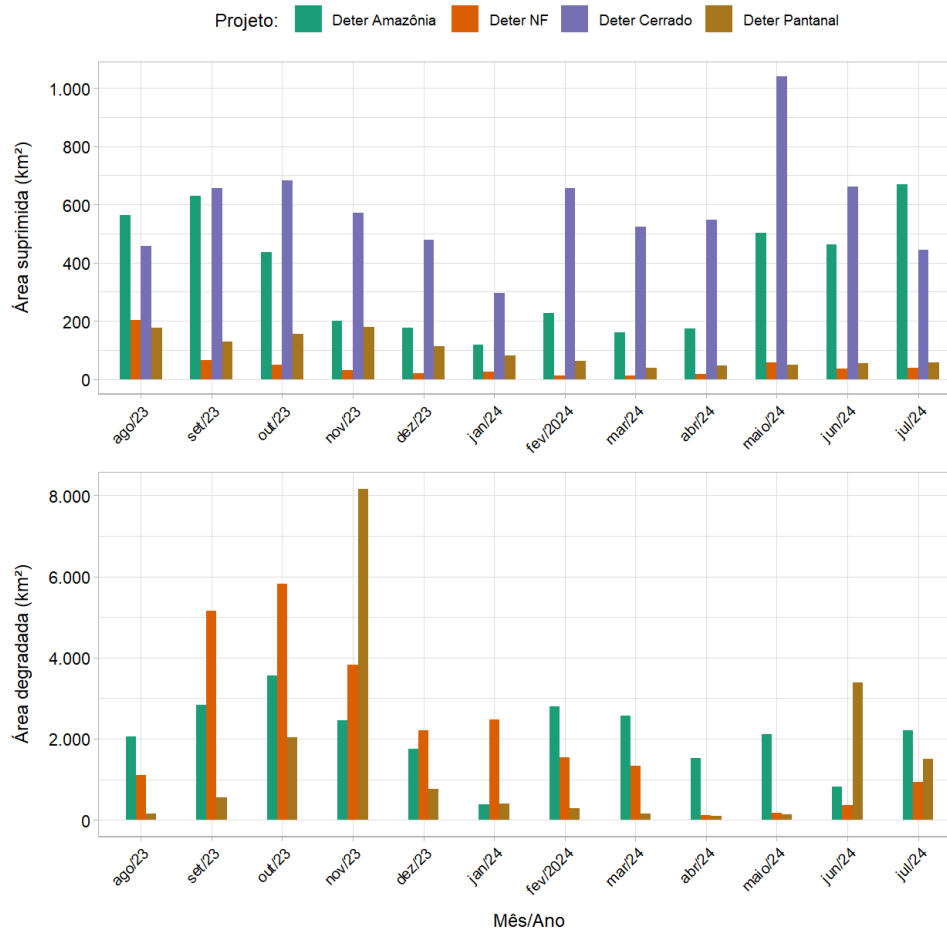


Figura 2: Supressão e degradação da vegetação nativa detectada por projetos selecionados do Deter entre agosto de 2023 e julho de 2024 (ano de referência 2023/2024).

agências de fiscalização. As principais características desses sistemas estão resumidas na Tabela 2.

3.2.1 Resultados do Deter

Os resultados do Deter Amazônia, NF, Cerrado e Pantanal, para o ano de referência 2023/2024 (que vai de agosto de 2023 a julho de 2024, ou o chamado ano Prodes 2024), estão ilustrados na Figura 2, com as classes agregadas em “Supressão” (classes de desmatamento, supressão e mineração) e “Degradação” (classes de corte seletivo, degradação e cicatrizes de queimada). Os resultados de outros projetos, períodos e agregações de classes podem ser consultados na plataforma web TerraBrasilis, disponível em <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>. Percebe-se que a área suprimida da vegetação nativa não é constante ao longo do ano. Em particular, destaca-se a queda de detecção do sistema Deter Amazônia de novembro a abril, que são meses de maior

nebulosidade devido à intensidade de chuvas na Amazônia.

Essa queda pode ocorrer por dois motivos concomitantes: 1) queda real nos eventos de supressão ou 2) cobertura de nuvens que impedem a detecção. O Deter é também o único sistema oficial do governo brasileiro monitorando eventos de degradação na Amazônia e no Pantanal.

3.2.2 Políticas públicas baseadas no Deter

Por ser utilizado como instrumento para apoio às atividades de fiscalização e controle do desmatamento, o Deter tem historicamente contribuído para a redução das áreas de supressão. Informações do Deter também são utilizadas pelo governo brasileiro para a proposta de leis e incentivos ao combate de queimadas, degradação e supressão ilegal da supressão da vegetação nativa. Estima-se que o Deter para ações de fiscalizações em campo que, aliadas à delimitação de

Tabela 4: Características do Sistema Deter do BiomasBR.

Sistema	Abrangência	Satélite (resolução)	Frequência, datas	Referência
TerraClass Amazônia	Bioma Amazônia	LANDSAT (30m) até 2020 e Sentinel-2/MSI (10m) a partir do mapeamento de 2020	2008, 2010, 2012, 2014, 2018, 2020 e 2022	[47]
TerraClass Cerrado	Bioma Cerrado		2018, 2020 e 2022	

áreas protegidas, reduziram as taxas de desmatamento da Amazônia Legal brasileira em 83% de 2004 a 2012 [40]. No Mato Grosso, 25% dos autos de infração entre 2005 e 2010 foram em áreas apontadas pelo Deter [41]. No bioma Amazônia, a utilização dos dados do Deter pelo Ibama aumentou não apenas o número de infrações, mas permitiu responsabilizar 12,5% dos culpados pelo desmatamento entre 2004 e 2011 [42].

Importante ressaltar que os dados do Deter não são adequados para quantificar com precisão o valor da área suprimida de vegetação nativa. Contudo, por sua frequência diária, estes dados têm sido eficientemente utilizados como indicador da intensidade do processo de “desmatamento” dos biomas Amazônia, Cerrado e Pantanal. Ao serem comparados os dados do Deter com o mesmo período nos anos anteriores, tem-se uma estimativa da tendência da supressão que deverá ser computada com precisão a partir dos dados Prodes. Estes dados têm sido regularmente anunciados pelo governo federal e divulgados pela imprensa (veja, por exemplo, a Ref. [43]).

3.3 TerraClass: monitoramento sistêmico da cobertura e uso da terra

O TerraClass é um sistema resultante do esforço colaborativo entre a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e o INPE, que utiliza imagens de satélite para classificar a cobertura e o uso da terra em áreas cuja vegetação nativa foi suprimida. Enquanto o Prodes fornece dados essenciais sobre a área da supressão, o TerraClass informa a cobertura e o uso da terra atual das regiões anteriormente cobertas por vegetação nativa. Juntos, esses sistemas oferecem uma visão abrangente sobre as mudanças da paisagem. O sistema TerraClass produz mapas bienais da terra para os biomas Amazônia e Cer-

rado, e a partir de 2025 deverá abranger todos os biomas brasileiros. As principais características e referências contendo os detalhes metodológicos do TerraClass estão sintetizadas na Tabela 3.

O TerraClass utiliza uma metodologia robusta para mapear e caracterizar o uso e a cobertura em áreas onde o Prodes já identificou a supressão da vegetação nativa, combinando análises de imagens de satélite, classificação semiautomática e interpretação visual. A validação dos dados é feita por instituição parceira em pontos aleatórios e assegurada por informações de campo e imagens de alta resolução espacial, garantindo qualidade e consistência no mapeamento.

Nos últimos anos, a metodologia do TerraClass tem incluído o uso de séries históricas de imagens de satélite para mapear os diferentes usos e coberturas da terra. Tecnologias avançadas, desenvolvidas no Brasil, como o Brazil Data Cube - BDC [44] e o pacote Satellite Image Time Series Analysis on Earth Observation Data Cubes - SITS [45], ambos desenvolvidos pelo INPE, possibilitaram a organização e processamento de grande volume de imagens. Para gerar a informação algoritmos de Inteligência Artificial, especialmente Aprendizado Profundo (deep learning), estão sendo utilizados para classificar as séries temporais.

Desta forma, diferentes classes de uso e cobertura são identificadas, como: pastagens, diferentes classes de agricultura, vegetação secundária, áreas urbanas, mineração, corpos d'água, entre outras.

3.3.1 Resultados do TerraClass

O sistema TerraClass atualizou recentemente os mapeamentos da transição do uso e cobertura da terra nos biomas Amazônia e Cerrado para os anos de 2018, 2020 e 2022, e atualmente está finalizando o dado de 2024. Estes biomas, que juntos somam 6,2 milhões de km², possuem cerca de

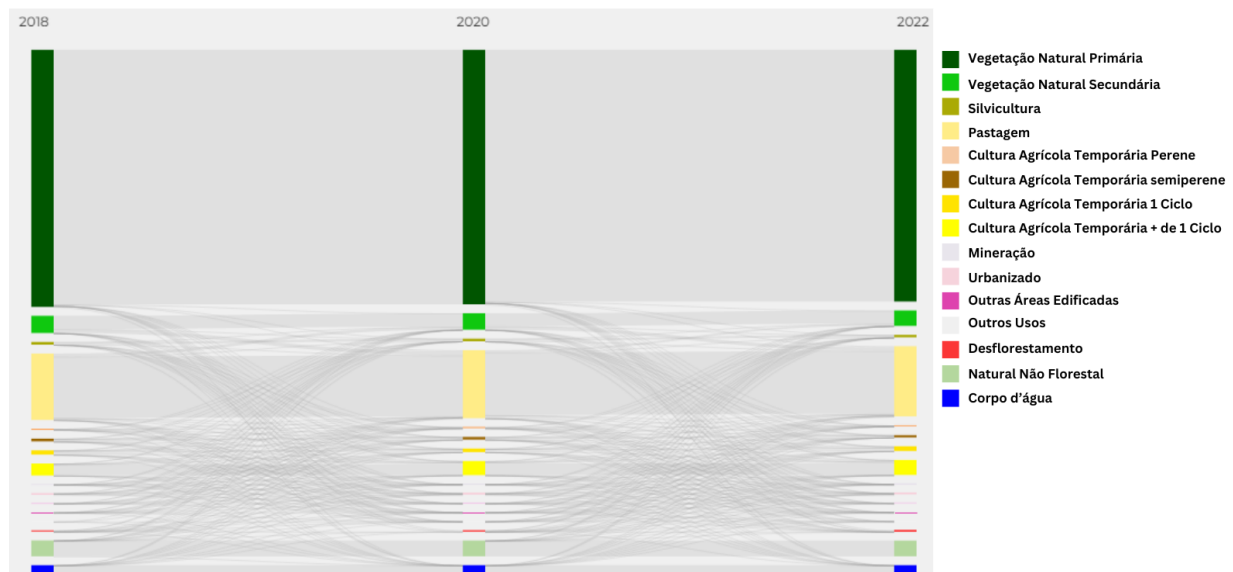


Figura 3: Mudanças no uso e cobertura do solo entre 2018, 2020 e 2022 para Amazônia e Cerrado, conforme dados do TerraClass.

65% de sua área (4 milhões de km²) preservada, com cobertura de vegetação nativa.

A Figura 3 apresenta as mudanças no uso e cobertura do solo dos biomas Amazônia e Cerrado de 2018 para 2020 e 2020 para 2022. No diagrama, as linhas em cinza representam a dinâmica do uso e cobertura do solo. Ou seja, as linhas horizontais representam a permanência, enquanto as linhas curvas representam as mudanças de classes entre os anos. Pastagens ocupam aproximadamente 18% (1,1 milhão de km²), enquanto 6% (400 mil km²) são utilizados para agricultura, incluindo os cultivos temporários, semi-perenes, perenes e silvicultura. Outros 4% (246 mil km²) correspondem à Vegetação Natural Secundária, sendo o restante distribuído entre categorias de menor expressão territorial.

As áreas antropizadas nesses biomas somam aproximadamente 1,8 milhão de km², das quais 62% são cobertas por pastagens, 22% por culturas agrícolas relacionadas à produção de alimentos, energia, fibras e madeira, e 14% por vegetação natural secundária em diferentes estágios de regeneração. Dentro das áreas antropizadas, as Culturas Agrícolas Temporárias correspondem a 17% (313 mil km²), com destaque para a Agricultura Temporária de Mais de 1 Ciclo, que representa 76% dessas áreas produtivas.

Os resultados indicam uma expansão de 22% na agricultura anual em ambos os biomas entre

2018 e 2022, ocupando mais 56 mil km². Notadamente, mais de 94% dessa expansão ocorreu sobre áreas previamente utilizadas para agropecuária, principalmente pastagens, enquanto aproximadamente 1% afetou áreas de vegetação natural primária (vegetação nativa que nunca sofreu supressão anteriormente) e secundária (vegetação nativa que sofreu regeneração após supressão).

Esses dados sugerem que a agricultura tem se expandido predominantemente sobre áreas já antropizadas, reduzindo a necessidade de desmatamento de novas áreas naturais. No entanto, a conversão de vegetação natural para pastagens continua sendo a principal causa de desmatamento. Apesar da dinâmica de conversão entre vegetação secundária e pastagens, há uma quantidade significativa de áreas em regeneração que permanecem estáveis nos dois biomas.

A regeneração da vegetação é um aspecto essencial a ser monitorado nos biomas Amazônia e Cerrado, especialmente considerando que a idade da vegetação secundária está diretamente relacionada ao aumento da biodiversidade [46]. Estudos indicam que, com o passar dos anos, a estrutura e a funcionalidade dos fragmentos de vegetação secundária tendem a melhorar devido ao aumento da diversidade e à composição de espécies.

Na Amazônia, as áreas de vegetação natural florestal secundária, formadas em locais que sofreram corte raso e foram abandonadas, cobriam

cerca de 169 mil km² em 2022, sendo que 31% (53 mil km²) estavam em regeneração há pelo menos 14 anos. Além disso, aproximadamente 39% (67 mil km²) dessas áreas estavam em regeneração por 10 anos ou mais. No Cerrado, a vegetação natural secundária ocupava 77 mil km² em 2022, o equivalente a 4% da superfície do bioma. Destas, 55% (42,5 mil km²) estavam em regeneração há pelo menos 4 anos. Monitorar a idade dessas áreas é fundamental, pois a vegetação secundária mais antiga tende a apresentar maior biodiversidade e estabilidade ecológica, desempenhando um papel fundamental na conservação ambiental.

3.3.2 Políticas públicas embasadas pelo TerraClass

O TerraClass é uma importante fonte de informação para políticas públicas relacionadas ao planejamento territorial. Analisar se há relação espacial entre o crescimento de áreas agrossilvipastoris e a supressão da vegetação nativa é parte da política de enfrentamento ao desmatamento e também de incentivos regionais para impulsionar a agricultura sustentável.

Além disso, o TerraClass apresenta dados oficiais para monitorar os compromissos assumidos pelo país com o reflorestamento, sendo o número de referência para o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) e garantindo a continuidade de investimentos e financiamentos internacionais que visam a recuperação ambiental, gerando informação também para a mensuração das estimativas de captura de GEE. Por outro lado, o monitoramento do crescimento das áreas agrossilvipastoris permite mensurar as estimativas de emissões de GEE.

4 Acesso aos dados BiomassBR

Os dados de monitoramento dos sistemas Prodes e Deter são sistematizados e disponibilizados ao público através da plataforma TerraBrasilis, desenvolvida e mantida pelo INPE (<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br>). Essa plataforma é uma ferramenta que permite a visualização e o download de dados dos dois sistemas de monitoramento de desmatamento e degradação ambiental, em formatos tabulares, raster e

vetorial, proporcionando informações detalhadas sobre a dinâmica do uso da terra no Brasil. Há ainda recursos interativos, como gráficos instantâneos (dashboard) e mapas, produzidos a partir das consultas feitas pelo usuário.

A partir das consultas, é possível quantificar áreas totais para as diferentes classes de desmatamento e de degradação monitoradas pelo Prodes, para diferentes recortes geográficos como estados, municípios, unidades de conservação e terras indígenas para todos os biomas. O sistema Deter, até o momento, disponibiliza dados em dashboard apenas para os biomas Amazônia e Cerrado. Dessa forma, a TerraBrasilis não apenas disponibiliza dados essenciais para gestores públicos, pesquisadores e ambientalistas, mas também oferece uma plataforma de fácil acesso para o monitoramento contínuo e a tomada de decisões sobre políticas ambientais e ações de preservação, identificando prontamente onde direcionar políticas e ações de comando e controle. Os dados do TerraClass estão disponíveis para qualquer usuário por meio do site <https://data.inpe.br/big/web/biomassbr/terraclass-monitoramento-sistematico-de-uso-e-cobertura-da-terra>, permitindo amplo acesso às informações e promovendo transparência no monitoramento e análise do uso da terra nos biomas brasileiros. Também é possível consultar os dados TerraClass em uma plataforma de recursos interativos, gerados a partir das consultas feitas pelo usuário, por bioma, por ano e por tipo de visualização, no endereço <https://www.terraclass.gov.br/webgis>.

5 Considerações finais

Os sistemas Prodes, Deter e TerraClass, desenvolvidos pelo INPE, representam pilares fundamentais para o monitoramento ambiental no Brasil, destacando-se pela robustez científica e tecnológica. Cada um desses sistemas desempenha um papel único, mas complementar, no entendimento das dinâmicas ambientais, contribuindo significativamente para a proteção dos biomas brasileiros, em especial a Amazônia Legal.

O Prodes, ativo desde 1988 para a Amazônia, e reconhecido mundialmente pela consistência de sua longa série histórica, é a base oficial para a mensuração das taxas anuais de perda florestal.

Esse sistema tem sido um elemento-chave para o Brasil cumprir compromissos climáticos internacionais, como o Acordo de Paris, fornecendo dados confiáveis e transparentes para relatórios nacionais e globais.

Além disso, os resultados do Prodes permitem identificar padrões espaciais e temporais do desmatamento, orientando ações estratégicas de conservação e fiscalização.

O Deter, por sua vez, complementa o Prodes ao oferecer alertas quase em tempo real sobre eventos de desmatamento e degradação florestal, essenciais para ações rápidas de combate ao desmatamento ilegal. Este sistema tem sido amplamente utilizado por órgãos de fiscalização ambiental, como o IBAMA e Secretarias Estaduais de Meio Ambiente, e forças policiais, permitindo intervenções mais ágeis e eficazes. Em cenários de intensificação do desmatamento, o Deter demonstrou ser uma ferramenta indispensável para reduzir perdas ambientais em áreas de grande pressão antrópica.

O TerraClass oferece uma visão detalhada da dinâmica de uso e ocupação do solo nas áreas previamente desmatadas, preenchendo lacunas críticas no entendimento do destino dessas áreas. Desde 2008, o sistema classifica as terras desmatadas em categorias como pastagens, agricultura, regeneração natural e áreas urbanizadas, proporcionando um panorama mais amplo das transformações socioeconômicas e ecológicas associadas ao desmatamento. Esses dados têm sido utilizados em estudos acadêmicos, formulação de políticas públicas e estratégias de gestão territorial.

Até janeiro de 2025, foram computados 1.674 artigos, em 539 revistas científicas que fazem citação ao Prodes Amazônia [48]. Contudo, a relevância dos sistemas do BiomasBR transcende a esfera científica. Eles desempenham um papel central na promoção da transparência, permitindo à sociedade acompanhar e avaliar o cumprimento das metas ambientais do Brasil. Além disso, o acesso público aos dados promove um ambiente democrático, informações qualificadas estão disponíveis para subsidiar debates e decisões em diferentes setores, desde a gestão pública até iniciativas do setor privado.

Do ponto de vista ambiental, os sistemas contribuem para a conservação dos serviços ecossistêmicos e da biodiversidade, alertando para as con-

sequências da perda de cobertura vegetal. Socialmente, auxiliam no planejamento de ações de desenvolvimento sustentável, incluindo programas que buscam aliar conservação e geração de renda em áreas críticas. Em termos de políticas públicas, as informações geradas pelo Prodes, Deter e TerraClass têm sido fundamentais para a formulação e avaliação de políticas ambientais, como o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm), que já demonstrou resultados significativos na redução do desmatamento. Assim, os sistemas Prodes, Deter e TerraClass não apenas consolidam o papel do INPE como uma referência internacional em monitoramento ambiental, mas também reforçam a importância de garantir recursos para ciência, tecnologia e inovação no enfrentamento dos desafios ambientais globais. Ao integrar dados científicos de alta qualidade com ações práticas, esses sistemas contribuem para a conservação dos recursos naturais, promovendo uma relação mais harmoniosa entre sociedade, economia e meio ambiente, em prol de um desenvolvimento verdadeiramente sustentável.

6 Agradecimentos

Agradecimento ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico (CNPq) – processo 422354/2023-6 (Monitoramento e avisos de mudanças de cobertura da terra nos Biomas Brasileiros – capacitação e semiautomatização do programa BiomasBR), sediado e executado pelo INPE.

Sobre os autores

Cláudio Aparecido de Almeida (claudio.almeida@inpe.br) é agrônomo, com mestrado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e doutorado em Geomática pela Université de Montpellier. Tecnologista sênior no INPE, atualmente é o coordenador do programa BiomasBR.

Letícia Palazzi Perez (leticia.palazzi@gmail.com) é geógrafa, mestre em Engenharia e doutora em Geografia Física pela Universidade de São Paulo. Desenvolve

pesquisa relacionada aos impactos, vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas em assentamentos humanos e compõe a equipe BiomassBR do INPE, no Prodes Amazônia.

Mariane Souza Reis (mariane.reis@inpe.br) é engenheira ambiental, mestre em Sensoriamento Remoto e doutora em Ciência do Sistema Terrestre pelo INPE. Desenvolve pesquisas em processamento de imagens e aprendizado de máquina para a análise do uso e cobertura da terra e atua como especialista em radares de abertura sintética no Deter, do Programa BiomassBR do INPE.

Vagner Luis Camilotti (vagner.camilotti@gmail.com) é Médico Veterinário (UFMS), Tecnólogo em Geoprocessamento (FA-TEC Jacaré), mestre em Ecologia (UFRGS) e Doutor em Ciência do Sistema Terrestre (INPE). Desenvolve pesquisas na área de Ecologia da Paisagem e uso e cobertura da terra e compõe a equipe Prodes Amazônia do Programa BiomassBR do INPE.

Cassiano Gustavo Messias (cassiano.messias@inpe.br) é geógrafo, com mestrado e doutorado em Geografia pela Universidade Estadual de Campinas. Trabalha com produtos de sensores remotos no monitoramento do uso e cobertura da terra e é coordenador técnico das equipes Prodes Amazônia, Prodes Pantanal, Deter não-floresta e Deter Pantanal, no programa BiomassBR do INPE.

Erison Carlos dos Santos Monteiro (oierison@gmail.com) é biólogo, mestre em Ecologia pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul e doutor em Ecologia pela Universidade Estadual Paulista. Pesquisa dinâmica da paisagem com o uso de inteligência artificial e Sensoriamento Remoto, e atua no programa BiomassBR do INPE como coordenador técnico do TerraClass Cerrado.

Taise Farias Pinheiro (pinheiroftaise@gmail.com) é bióloga, mestre em Sensoriamento Remoto e doutora em Ciência do Sistema Terrestre pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atua no uso de Geotecnologias para a análise da paisagem na Amazônia e no Cerrado, e atualmente é auditora no Prodes e Deter Cerrado, do Programa BiomassBR do INPE.

João Felipe Sobrinho Kneipp Cerqueira Pinto (jfkneipp@gmail.com) é geógrafo, mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal do

Pará. Atua nas áreas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e monitoramento do uso e cobertura da terra no Cerrado brasileiro e é coordenador técnico das equipes Prodes Cerrado e Deter Cerrado do programa BiomassBR do INPE.

Luciana de Souza Soler (luciana.soler@inpe.br) é bacharel em física pela UFMS, mestre em Sensoriamento Remoto pelo INPE, PhD em Ecologia de Produção e Conservação de Recursos pela Universidade de Wageningen, Holanda, e Pós-doutora pelo CCST/INPE. Atua como coordenadora geral de gestão em RH, pesquisa, desenvolvimento e inovação do Programa BiomassBR do INPE, nos sistemas Prodes, Deter e TerraClass.

Lubia Vinhas (lubia.vinhas@inpe.br) é bacharel em Ciência da Computação, com mestrado e doutorado em Computação Aplicada pelo INPE. É Pesquisadora Sênior do INPE desde 1997, e atua no suporte tecnológico para os projetos de monitoramento e na manutenção e aprimoramento da plataforma TerraBrasilis do programa BiomassBR.

Luis Eduardo Pinheiro Maurano (luis.maurano@inpe.br) é graduado em Computação e mestre em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atua desde 2013 como Tecnologista Sênior do INPE e participa como membro da equipe técnica do programa BiomassBR nas áreas de geoprocessamento, banco de dados e desenvolvimento de sistemas webgis.

Marcos Adami (marcos.adami@inpe.br) é economista, com mestrado e doutorado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. É Pesquisador Titular no INPE, atuando nas áreas de mudança de uso da terra e estatísticas agrícolas e compõe a equipe do BiomassBR do INPE como coordenador do TerraClass Amazônia.

Tatiana Mora Kuplich (tatiana.kuplich@inpe.br) é bióloga, com Mestrado em Sensoriamento Remoto pelo INPE e Doutorado em Geografia pela University of Southampton na Inglaterra. É Tecnologista Sênior do INPE e pesquisa sobre os biomas brasileiros, especialmente o Pampa.

Gustavo F. Balué Arcoverde (gustavo.arcverde@inpe.br) é geógrafo, com mestrado e doutorado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais. É Tecnologista Pleno pelo INPE desde 2015 e atua como coordenador da equipe Prodes no bioma Caatinga.

Igor da Silva Narvaes (igornarvaes@inpe.br) é Engenheiro Florestal, com Mestrado em Engenharia Florestal pela UFSM e Doutorado em Sensoriamento Remoto pelo INPE. É Pesquisador Sênior do INPE e pesquisa sobre os biomas brasileiros, especialmente o Pampa e a região sul da Mata Atlântica.

Silvana Amaral (silvana.amaral@inpe.br) é ecóloga, com mestrado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, e doutorado em Engenharia/Informação Espacial pela Universidade de São Paulo. Pesquisadora do INPE desde 1995, é atualmente coordenadora substituta do Programa BiomasBR do INPE.

Referências

- [1] W. Steffen et al., *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure* (Springer, Berlin, 2004).
- [2] B. L. Turner II e W. B. Meyer, *Global Land Use and Land Cover Change: An Overview*, in *Changes in land use and land cover: a global perspective*, editado por W. Meyer e B. L. Turner II (Cambridge University Press, 1994), 3–10.
- [3] A. Chhabra et al., *Multiple Impacts of Land-Use/Cover Change*, in *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts* (Springer, 2006), 71–116.
- [4] IPCC, *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* (IPCC, Geneva, 2014). Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>, acesso em mar. 2025.
- [5] United Nations Environment Programme - UNEP, *Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments* (UNEP, Nairobi, 2024).
- [6] Brasil, Governo Federal, *BRAZIL'S NDC - National determination to contribute and transform* (Brasil, Brasília, DF, 2024). Disponível em https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_November2024.pdf, acesso em mar. 2025.
- [7] P. Friedlingstein et al., *Global Carbon Budget 2023*, *Earth System Science Data* **15**(12), 5301 (2023).
- [8] E. Rödiger et al., *The importance of forest structure for carbon fluxes of the Amazon rainforest*, *Environmental Research Letters* **13**(5), 054013 (2018).
- [9] L. V. Gatti et al., *Increased Amazon carbon emissions mainly from decline in law enforcement*, *Nature* **621**(7978), 318 (2023).
- [10] Brasil, *Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências* (2009). Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm, acesso em jan. 2025.
- [11] Brasil, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, *Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAM) - 5a fase (2023 a 2027)* (MMA, Brasília-DF, 2023). Disponível em <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/combate-ao-desmatamento-queimadas-e-ordenamento-ambiental-territorial/controle-do-desmatamento-1/amazonia-ppcdam-1/5a-fase-ppcdam.pdf>, acesso em mar. 2025.
- [12] L. Maurano, C. A. Almeida e M. Meira, *Monitoramento do desmatamento do cerrado brasileiro por satélite - PRODES Cerrado*, in *XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, editado por D. F. M. Gherardi, L. E. O. C. Aragão e I. D. A. Sanches (INPE, São José dos Campos, 2019), 191–194. Disponível em <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP6W34M/3U24F8S>, acesso em mar. 2025.

- [13] INPE, *Metodologia da detecção do desmatamento no bioma Cerrado: Mapeamento de áreas antropizadas com imagens de média resolução espacial* (INPE, São José dos Campos, 2018).
- [14] C. G. Messias et al., *Unaccounted for nonforest vegetation loss in the Brazilian Amazon*, *Commun. Earth Environ.* **5**(1), 451 (2024).
- [15] K. R. Ferreira, L. Santos e M. C. A. Picoli, *Evaluating distance measures for image time series clustering in land use and cover monitoring*, in *2019 European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML/PKDD)*, editado por T. Corpetti et al. (CEUR, Würzburg, Germany, 2019). Disponível em <https://ceur-ws.org/Vol-2466/paper5.pdf>, acesso em mar. 2025.
- [16] C. A. Almeida et al., *Metodologia utilizada nos sistemas PRODES e DETER - 2ª edição (atualizada)* (INPE, São José dos Campos, 2022). Disponível em <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP3W34T/47GAF6S>, acesso em mar. 2025.
- [17] C. Almeida et al., *Mapping natural non-forest vegetation removal in the Brazilian Amazon – a pilot project*, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XLIII-B3-2022**, 1341 (2022).
- [18] F. O. Passos et al., *Efeito da resolução espacial sobre a série histórica de monitoramento de desmatamento da Mata Atlântica*, in *XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, editado por D. F. M. Gherardi, L. E. O. C. Aragão e I. D. A. Sanches (INPE, 2023), 1598–1601. Disponível em <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/efeito-da-resolucao-espacial-sobre-a-serie-historica-de-monitoramento-de-desmata?lang=pt-br>, acesso em mar. 2025.
- [19] G. F. B. Arcoverde et al., *Patterns of natural vegetation removal in the Caatinga biome in Prodes Project scope*, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XLVIII-3-2024**, 9 (2024).
- [20] T. M. Kuplich et al., *Brazilian Pampa as part of the INPE's official program for mapping native vegetation removal*, *Abstracts of the ICA* **6**, 1 (2023).
- [21] C. E. F. Young, *Desmatamento e desemprego rural na Mata Atlântica*, *Floresta e Ambiente* **13**(2), 75 (2006). Disponível em <https://www.scielo.br/j/floram/a/bMKBhrMKtcPht7KvTmGJLKR/>, acesso em mar. 2025.
- [22] S. Amaral et al., *Alarming patterns of mature forest loss in the Brazilian Atlantic Forest*, *Nature Sustainability* (2025).
- [23] M. Bizerril, *O cerrado para educadores(as): sociedade, natureza e sustentabilidade* (Hakui, São Paulo, 2021).
- [24] R. Zorzetto, *Cerrado ameaçado*, *Revista Pesquisa FAPESP* **309**, 52 (2021). Disponível em https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2021/10/052-057_cerrado_309.pdf, acesso em mar. 2025.
- [25] C. W. Porto-Gonçalves et al., *Os cerrados e os fronts do agronegócio no Brasil*, in *Conflitos no Campo – Brasil 2016*, editado por A. Canuto, C. R. S. Luz e T. P. Andrade (CPT, Goiânia, 2017), 74–87. Disponível em <https://www.cptnacional.org.br/downloads?task=download.send&id=14061&catid=41&m=0>, acesso em mar. 2025.
- [26] J. B. Conti e S. A. Furlan, *Geoeecologia: o clima, os solos e a biota*, in *Geografia do Brasil*, editado por J. L. S. Ross (Edusp, São Paulo, 2011).
- [27] D. P. Costa et al., *All deforestation matters: deforestation alert system for the Caatinga biome in South America's tropical dry forest*, *Sustainability* **16**(20), 9006 (2024).
- [28] C. J. R. Alho et al., *Ameaças à biodiversidade do Pantanal brasileiro pelo uso e ocu-*

- pação da terra, *Ambiente & Sociedade* **22**, e01891 (2019).
- [29] C. G. Messias et al., *Análise das taxas de desmatamento e seus fatores associados na Amazônia Legal brasileira nas últimas três décadas*, *Raega - O Espaço Geográfico em Análise* **52**, 18 (2021).
- [30] Brasil, *Decreto nº 11.687, de 5 de setembro 2023* (2023). Disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.687-de-5-de-setembro-2023-508071575>, acesso em jan. 2025.
- [31] M. E. Skidmore et al., *Cattle supply chain fidelity in the Brazilian Amazon: key considerations for deforestation monitoring*, *Environmental Research Letters* **19**(11), 114012 (2024).
- [32] J. Alix-Garcia e H. K. Gibbs, *Forest conservation effects of Brazil's zero deforestation cattle agreements undermined by leakage*, *Global Environmental Change* **47**, 201 (2017).
- [33] T. P. Pinheiro et al., *The near real-time deforestation detection system: Case study of the DETER system for the Cerrado Biome*, *Applied Earth Science: Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy* **132**(3–4), 271 (2023).
- [34] C. G. Messias et al., *DETER Monitoring on Non-Forest Vegetation in the Brazilian Amazon*, *Revista Brasileira de Cartografia* **76**, 1 (2024).
- [35] INPE, *Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites: sistemas Prodes, Deter, Degrad e Queimadas 2007-2008* (INPE, São José dos Campos, 2008). Acesso em 10 jan. 2025. Disponível em http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/degrad/arquivos/Relatorio_Prodes2008.pdf.
- [36] C. A. Almeida et al., *Metodologia dos sistemas Prodes e Deter para o bioma Cerrado* (INPE, São José dos Campos, 2024).
- [37] L. E. P. Maurano et al., *Deter Intenso and forest monitor: improving the alerting of deforestation in the Brazilian Amazon Rainforest*, in *XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, editado por D. F. M. Gherardi, L. E. O. C. Aragão e I. D. A. Sanches (INPE, 2023), 3219–3222. Disponível em <https://proceedings.science/sbsr/sbsr-2023/trabalhos/deter-intenso-and-forest-monitor-improving-the-alerting-of-deforestation-in-the?lang=pt-br>, acesso em mar. 2025.
- [38] J. Doblas et al., *DETER-R: An operational near-real time tropical forest disturbance warning system based on Sentinel-1 time series analysis*, *Remote Sensing* **14**(15), 3658 (2022).
- [39] J. Doblas et al., *DETER-RT: The new INPE-TropiSCO deforestation monitoring system in the Amazon biome*, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XLVIII-3-2024**, 127 (2024).
- [40] J. Assunção, C. Gandour e R. Rocha, *DETER-ing Deforestation in the Amazon: Environmental Monitoring and Law Enforcement*, *American Economic Journal: Applied Economics* **15**(2), 125 (2023).
- [41] R. A. Teures e A. C. C. Castilho, *Relação entre Autos de Infração lavrados pelo IBAMA e detecções do sistema DETER no estado de Mato Grosso*, in *XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, editado por J. C. N. Epiphanyo e L. S. Galvão (INPE, 2011), 2975–2980. Disponível em <http://urlib.net/ibi/3ERPFQRTRW/39UG69B>, acesso em mar. 2025.
- [42] R. Rajão, A. Alencar e A. Azevedo, *A revolução tecnológica do IBAMA e os limites do comando e controle na Amazônia*, *Boletim Amazônia em Palta* **4** (2015). Disponível em <https://www.lagesa.org/wp-content/uploads/documents/Rajao%2014%20Revolucao%20Tecnologica%20no%20IBAMA%20>

- [%20IPAM%20Amazonia%20em%20Pauta.pdf](#), acesso em jan. 2025.
- [43] Secretaria de Comunicação Social, Brasil, *Amazônia: desmatamento em agosto de 2024 foi o menor em seis anos* (2024). Disponível em <https://www.gov.br/secom/pt-br/assuntos/noticias/2024/09/amazonia-desmatamento-em-agosto-de-2024-foi-o-menor-em-seis-anos>, acesso em jan. 2025.
- [44] K. R. Ferreira et al., *Earth observation data cubes for Brazil: Requirements, methodology and products*, *Remote Sensing* **12**(24), 4033 (2020).
- [45] R. Simoes et al., *Satellite image time series analysis for big earth observation data*, *Remote Sensing* **13**(13), 2428 (2021).
- [46] F. V. Costa et al., *Synthesis of the first 10 years of long-term ecological research in Amazonian Forest ecosystem – implications for conservation and management*, *Natureza & Conservação* **13**(1), 3 (2015).
- [47] C. A. Almeida et al., *High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data*, *Acta Amazonica* **46**(3), 291 (2016).
- [48] *Citações ao PRODES Amazônia*, INPE (2025). Disponível em <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes/citacoes-ao-prodes>, acesso em jan. 2025.