



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



**DETECÇÃO DE CICATRIZES DE ÁREAS QUEIMADAS NO OESTE DO
ESTADO DE RONDÔNIA POR DIFERENTES PRODUTOS GLOBAIS E
REGIONAIS E SUAS IMPLICAÇÕES PARA AS ESTIMATIVAS DE
EMISSÕES DE CARBONO**

Poliana Domingos Ferro

INPE
São José dos Campos
2022



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



**DETECÇÃO DE CICATRIZES DE ÁREAS QUEIMADAS NO OESTE DO
ESTADO DE RONDÔNIA POR DIFERENTES PRODUTOS GLOBAIS E
REGIONAIS E SUAS IMPLICAÇÕES PARA AS ESTIMATIVAS DE
EMISSÕES DE CARBONO**

Poliana Domingos Ferro

Monografia apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, como requisito parcial da disciplina SER - 300 Introdução ao Geoprocessamento, no curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto, ministrado pelo docente Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro.

INPE
São José dos Campos
2022

RESUMO

A quantificação das queimadas de forma fidedigna com a realidade, continua sendo uma tarefa desafiadora para estimar os impactos ambientais e expor a magnitude das perdas socioeconômicas relacionadas ao fogo na Amazônia, especialmente para emissões de carbono. Os produtos de áreas queimadas existentes apresentam limitações a depender da escala de estudo, decorrente das características e especificações inerentes a cada sensor utilizado para gerar o mapeamento das cicatrizes. Diante disso, o estudo visou avaliar o desempenho dos produtos de áreas queimadas globais e regionais em uma região do oeste do estado de Rondônia em 2020, e compará-los com um mapeamento de referência local, visando entender as potencialidades e limitações de cada produto para estudos regionais de estimativas de emissão de carbono pelo fogo. A metodologia de análise, adotou três critérios de avaliação para identificar qual o melhor produto de área queimada para a área de estudo: a avaliação quantitativa, avaliação estatística e análise de acordos/similaridade. As estimativas de áreas queimadas foram obtidas para coberturas florestais e não florestais. Os resultados demonstraram que a maioria das queimadas ocorreram em área de não floresta 89%, no entanto, 11% de áreas de florestas nativas foram afetadas pelo fogo na região. Na intercomparação dos produtos com a referência do Sentinel – 2 e planet, os produtos MapBiomas obteve o melhor desempenho, seguido pelo produto CBERS em todos os parâmetros analisados, por outro lado os produtos globais Fire cci e GABAM tiveram o pior desempenho do conjunto de dados, subestimando 88% e 85%, respectivamente. O produto MCD64A1 omitiu em média 40% de área queimada, CBERS superestimou em média 12% e MapBiomas subestimou em 7,5%. Os produtos regionais MapbiomasFogo e CBERS sobressaíram aos demais produtos de área queimada globais, e são os produtos mais parecidos entre si e mais próximos da referência. Embora o composto do CBERS possua resolução espacial mais grosseira que o Mapbiomas, conseguiu obter desempenho semelhante, o que traz boas perspectivas para novos estudos. A escolha do produto a ser adotado como fonte de entrada para estimativas de emissão de Carbono influenciará as taxas de emissão.

Palavras-chave: Área queimada, Produtos globais e regionais, Rondônia, Intercomparação, Carbono.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Área de estudo localizada no Estado de Rondônia, Sudoeste da Amazônia brasileira.....	10
Figura 2- Visão Metodológica dos processamentos.....	15
Figura 3- Área total queimada mapeada pelos produtos e sua distribuição espacial: Referência, CBERS, Mapbiomas Fogo, MCD64A1, GABAM e Fire cci.	18
Figura 4 - Total de área queimada mapeada por Referência, CBERS, MapBiomas, MCD64A1, GABAM e Fire cci sobre coberturas florestais e não florestais, considerando toda a área de estudo.....	19
Figura 5- Espacialização da área queimada em uma grade regular de 1 km x 1 km. Cada célula da grade contém a proporção queimada indicada pelo gradiente de cor.	21
Figura 6- Avaliação das áreas queimadas mapeadas na Referência (no eixo y) com CBERS (a), MapBiomas Fogo (b), MCD64A1 (c), GABAM (d) e Fire cci (e).	22
Figura 7- Gráficos de dispersão de regressão por células de grade em comparação com CBERS (a, b, c, d), MapBiomas (e, f, g), MCD64A1 (h, i) e GABAM (j), considerando células de grade com dimensões laterais de 1 km, para obter o r.....	24
Figura 8- Mapas de similaridade do melhor e do pior par de comparação de produtos de área queimada. O índice de similaridade foi calculado considerando apenas células que apresentam detecção de área queimada por pelo menos um produto. O índice de similaridade vai de 0(menor semelhança) destacado por vermelho escuro a 1 (maior semelhança) destacado por azul.	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição das características dos produtos de área queimada.....	13
Tabela 2 - Número de células em diferentes classes de proporção queimada.	21
Tabela 3 - Avaliação dos produtos de área queimada.....	23
Tabela 4 - Semelhança geral para cada par de comparação de produto de área queimada, considerando toda a área de estudo. O índice de similaridade varia de 0 (totalmente distinto) a 1 (totalmente idêntico), e foi calculado usando o algoritmo numérico fuzzy para comparação de mapas.	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1	Área de Estudo.....	10
2.2	Conjunto de dados de Sensoriamento Remoto	10
2.2.1	Produtos de Área Queimada.....	10
2.2.2	Mapa de Referência	13
2.2.3	Mapa Florestal e Não Florestal	14
2.3	Visão Metodológica: Avaliação quantitativa, Avaliação Estatística e Análise de Acordos.....	15
3	RESULTADOS.....	17
3.1	Abordagem Vetorial: Distribuição espacial da área total queimada e estimativas por cobertura terrestre.....	17
3.2	Abordagem Matricial: Avaliação Estatística e Análise de Acordos..	20
4	DISCUSSÕES.....	26
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
	REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

As queimadas e os incêndios florestais têm se tornado umas das maiores preocupações mundiais nos últimos anos, dado o aumento da recorrência desses eventos e sua contribuição para as emissões de CO² na atmosfera, contribuindo significativamente para as alterações climáticas globais (ANDERSON et al, 2005; BARLOW et al., 2012; ARAGÃO et al, 2018; SILVA JUNIOR et al, 2019). Estudos demonstram que todos os anos, principalmente durante o período de seca, milhares de hectares dos biomas e ecossistemas estão sendo queimados e, com isso, submetidos a danos irreparáveis (PIVELLO et al., 2021).

Os impactos negativos relacionados ao fogo podem desestabilizar os estoques de carbono dos ecossistemas terrestres, promover perdas econômicas, impactar a qualidade do ar, ocasionar problemas de saúde respiratória na população (ANDERSON et al., 2011; BARLOW et al., 2012; CAMPANHARO et al, 2019) e, também, causar danos à conservação da biodiversidade e a provisão dos serviços ecossistêmicos (CHUVIECO et al., 2014; VEENENDAAL et. al, 2015).

Na Amazônia, a ocorrência de queimadas está associada às atividades antrópicas, principalmente para limpeza de áreas agrícolas e formação de pastagens (FEARNSIDE, 2005; MORTON et. al., 2008) ou para a prática de desmatamento, no sistema de corte seguida da queima (DAVIDSON et. al, 2012; JUÁREZ-OROZCO et. al, 2017). No entanto, ao contrário do cerrado brasileiro, em que a vegetação evoluiu com a presença do fogo, na Amazônia o fogo não faz parte do sistema natural, afetando áreas sensíveis e trazendo sérios problemas para o ecossistema local (ARAGÃO et al., 2018).

Em um estudo realizado por Matricardi et al. (2020), os autores quantificaram ao longo de 22 anos de medições da degradação florestal na Amazônia ocasionadas pelos distúrbios do fogo e da extração de madeira e concluíram que a área total degradada foi superior a área desmatada, de 1992 a 2014 a área total de floresta degradada foi de 337.427 km², contra 308.311 km² de áreas desmatadas. Em outro esforço para quantificação das áreas afetadas por eventos de fogo na Amazônia brasileira, foi realizado pelo projeto de

Mapeamento das cicatrizes de fogo do Brasil – MapBiomias Fogo, em que foi mapeado o total de áreas afetadas por queimadas nos últimos 36 anos, ao todo a área total impactada por queimadas na Amazônia entre 1985 e 2021 foi de 236.000 km², tendo constatado o aumento da recorrência desses eventos nos últimos 3 anos (ALENCAR, et al., 2022).

A importância de se entender a espacialização das queimadas e incêndios florestais se torna cada vez maior, tendo em vista os impactos decorrentes desses eventos nas escalas locais, regionais e globais (HOOD et al., 2018;; BRANDO et al., 2019a; BRANDO et al., 2019b; MATRICARDI et al., 2020; SILVA-JUNIOR et al., 2021). Uma das variáveis usadas para quantificar a magnitude de tais eventos e estimar emissões de carbono oriundos de áreas queimadas é o tamanho total da área afetada. Atualmente, diversos produtos de área queimada globais estão disponíveis (GABAM, MCD64A1, TREES, GWIS), oriundo de diferentes abordagens metodológicas e diferentes satélites, os quais buscam o reconhecimento de padrões espectrais para classificar os pixels de área queimada (CHUVIECO et. al; 2019; CASTILHO et. al, 2020). Entretanto, em virtude das características e peculiaridades de cada dado, incertezas, limitações e discrepâncias são observadas e vêm sendo discutidas na literatura (HUMBER et al., 2019; PÊSSOA et al., 2020; SHIMABUKURO et al., 2020).

Apesar da contribuição significativa desses produtos globais para a modelagem do fogo, evidencia-se que, regionalmente, o uso destes produtos pode ser crítico na subestimação da área queimada, dado a incapacidade de mapear pequenas cicatrizes em função da baixa resolução espacial, como o produto do MODIS (500m), ou ainda a omissão em certas regiões na Amazônia (PÊSSOA et al., 2020; SHIMABUKURO et al., 2020). O que impõe grandes desafios para produção de estimativas fidedignas dos impactos relacionados ao fogo em regiões tropicais, onde a recuperação do sinal espectral da vegetação pode ser rápida, dado as características efêmeras das cicatrizes de fogo, e a persistente cobertura de nuvens em épocas do ano (CANAS, CHUVIECO, 2015).

À medida que surgem novos produtos de área queimada, com diferentes abordagens e metodologias, como os produtos regionais MapBiomias Fogo e o produto CBERS, é fundamental investigar suas potencialidades e limitações.

Como nenhum produto é um retrato terrestre e todos têm limitações, a escolha do produto a ser utilizado deve considerar as vantagens e desvantagens em termos do objetivo de utilização dos dados, levando em conta o desempenho regional de cada um deles, especialmente em termos das estimativas de emissão de carbono, em que o produto de área queimada a ser utilizado como informação de entrada nos modelos de emissão, é preponderante para o cálculo de emissões.

Diante disso, o estudo pretende avaliar o desempenho dos produtos de áreas queimadas globais e regionais em uma região do oeste do estado de Rondônia em 2020, e compará-los com um mapeamento de referência local, visando entender as potencialidades e limitações de cada produto para estudos regionais de estimativas de emissão de carbono pelo fogo.

Os objetivos específicos são:

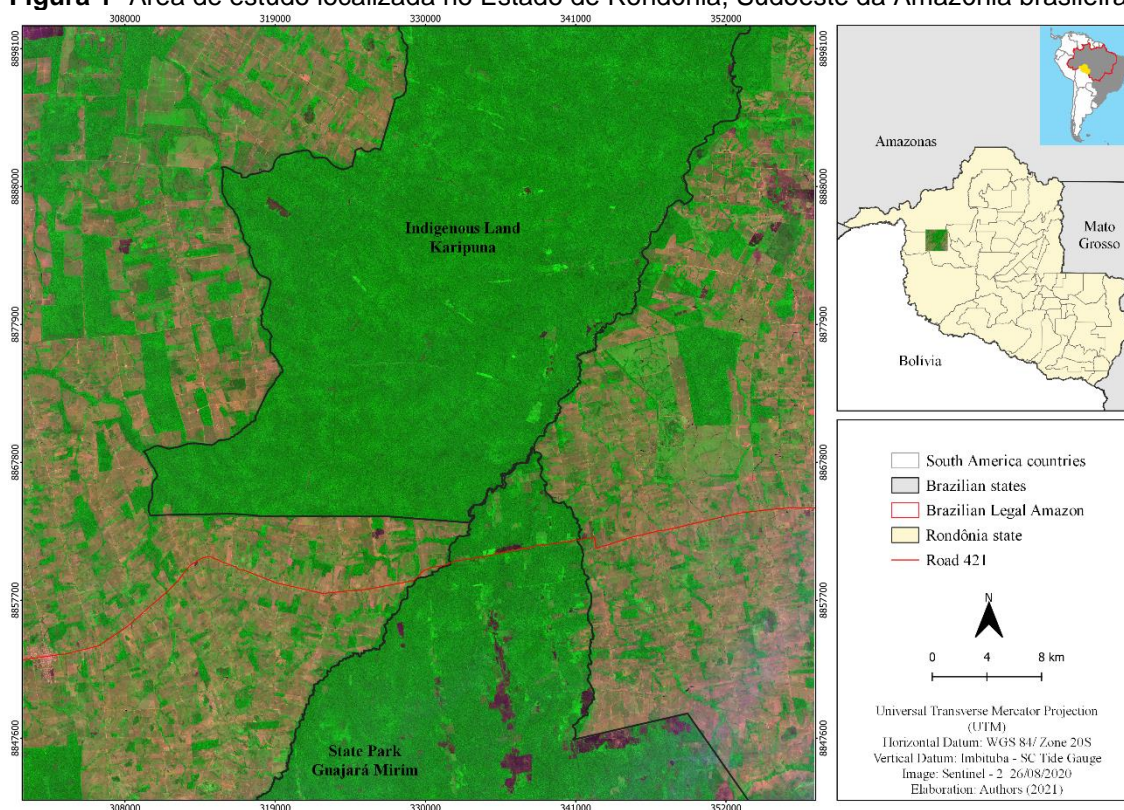
- a) Mensurar as diferenças entre os produtos de área queimada operacionais globais (MCD64A1, GABAM, Fire cci) e os regionais (MapBiomass Fogo e CBERS), em relação ao total de área queimada detectada sobre coberturas florestais e não florestais e a distribuição espacial.
- b) Comparar os produtos de área queimada globais e regionais com mapa de Referência de área queimada obtido por meio de dados do Sentinel-2 e Planet.
- c) Entender as potencialidades e limitações de cada produto de área queimada, visando selecionar o produto mais fidedigno com a realidade, para estimativas de emissão de carbono pelo fogo em inventários regionais na Amazônia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada no Sudoeste da Amazônia Brasileira, na região oeste do estado de Rondônia, abrangendo parte dos municípios de Nova Mamoré e Guajará – Mirim, e parte das áreas protegidas Parque Estadual Guajará-Mirim e a Terra Indígena Karipuna, na região do Vale do Jamari, uma área total de 3.296,50 km² (Figura 1).

Figura 1- Área de estudo localizada no Estado de Rondônia, Sudoeste da Amazônia brasileira.



2.2 Conjunto de dados de Sensoriamento Remoto

2.2.1 Produtos de Área Queimada

No que tange a extensão de área queimada afetada, tem-se observado um grande esforço no desenvolvimento de produtos automáticos e operacionais em escalas nacionais e globais. Entre essas iniciativas, uma série de conjuntos de dados estão disponíveis, selecionamos para este estudo os produtos operacionais globais amplamente utilizados na literatura, MCD64A1 (GIGLIO et

al., 2018), Fire Disturbance - Fire_cci (CHUVIECO et al., 2018) e Global Annual Burned Area Mapping - GABAM (LONG et al., 2019). Na escala nacional, existem dois produtos operacionais, o AQM1km do INPE e o produto Mapbiomas Fogo (ALENCAR et al., 2022), que fornecem dados de área queimada para todo o território nacional, em adição também está disponível os dados do produto TREES, que é um produto regional de mapeamento de áreas queimadas na Amazônia, e a disponibilidade de dados está restrito para o período de 2005 a 2016 (ANDERSON et al., 2015), para este estudo, selecionamos o produto operacional MapbiomasFogo. Além disso, um outro produto regional brasileiro não operacional denominado CBERS, de autoria própria (FERRO, 2021), foi selecionado para ser avaliado.

O produto Global MCD64A1 é um conjunto de dados globais de monitoramento de áreas queimadas desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), que incorpora os dados de reflectância de superfície advindos do Espectroradiômetro de Imagem de Resolução Moderada (MODIS) com 500m de resolução espacial, juntamente com as observações de fogo ativo de 1 km do MODIS, o seu algoritmo utiliza um índice de vegetação sensível a queima (VI) para criar limiares dinâmicos que são aplicados para produzir compostos mensais. O produto atualmente encontra-se na sua 6ª versão, e sofreu melhorias em relação as versões anteriores, com maior probabilidade de detecção de áreas queimadas e taxas reduzidas de falsas queimadas, havendo um esforço contínuo para minimizar as suas limitações (GIGLIO et al., 2018). Além disso, o produto tem sido aplicado como input para o desenvolvimento de outros produtos de área queimada e para modelos de emissões de queima da biomassa (YAMAGUCHI, 2015; ANDELA et al., 2018; MATAVELLI et al., 2021).

O produto Fire cci faz parte do programa Climate Change Initiative (CCI), desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA), que utiliza o conjunto de dados MODIS de 250 m de resolução espacial, incluindo imagens de reflexão (MOD09GQ) e focos ativos de fogo (MOD14ML). As imagens são agregadas em compostos mensais e o algoritmo de classificação é baseado no crescimento de regiões. O produto atualmente encontra-se na versão 5.1, e sofreu melhorias no

algoritmo de detecção de área queimada, o que permitiu detectar mais área queimada globalmente do que a versão 5.0, e expandiu o período de 2001 a 2020 em relação as versões anteriores (LIZUNDIA-LOIOLA et al, 2020).

O produto GABAM é um conjunto de dados globais de área queimada desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa de Informação Aeroespacial (RAD) da China e da Academia Chinesa de Ciências (CAS), o produto usa dados de refletância do Landsat de 30 m de resolução e informações de índices espectrais como entrada para o modelo Random Forest, além de uma abordagem de crescimento de regiões. O produto é construído a partir de um algoritmo automatizado implementado no Google Earth Engine (GEE). Atualmente o GABAM é o produto de área queimada global com melhor resolução espacial disponível, e as imagens são agregadas em compostos anuais, o que limita análises sazonais dentro de um ano (LONG et al., 2019).

O MapBiomas é o mais novo produto regional de mapeamento de área queimada disponível para o Brasil, desenvolvido pelo Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil (MAPBIOMAS). O produto utiliza mosaicos de imagens do satélite LANDSAT, com 30 metros de resolução espacial para o mapeamento de cicatrizes de queimadas. O método de classificação do projeto é o Deep Neural Network (DNN), também conhecido como redes neurais profundas, o qual consiste em modelos computacionais baseados em aprendizagem de máquina e reconhecimento de padrões visuais (ALENCAR et al., 2022). Esse método robusto de aprendizado profundo exige processamento computacional poderoso, sendo realizado em serviços de computação em nuvem disponível pelo Google. O mapeamento de área queimada conta com as etapas de treinamento e predição do algoritmo, em que há coleta de amostras em áreas queimadas e não queimadas para o treinamento do algoritmo, além de utilizar mapas auxiliares de queimada, como o produto MCD64A1 e focos de calor ativo disponíveis pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE. A pós - classificação conta com aplicação de filtros espaciais e máscaras para remover ruídos e reduzir a comissão. Os dados estão disponíveis em compostos mensais ou anuais.

Por fim o produto de área queimada denominado CBERS, é resultado de um mapeamento local realizado por Ferro (2021) para a região do Estado de Rondônia, disponível em compostos mensais para o ano de 2020. O produto utiliza cena do sensor de campo Largo (WFI) do CBERS 4 (64m) e CBERS 4A (55m) dos cubos de dados regulares do Brazil Data Cube (BDC) do INPE (BDC, 2021), reamostrados para 64 m. A resolução temporal de cada sensor é em torno de 5 dias, em conjunto mapeiam a mesma superfície em 2,5 a 3 dias. Para o mapeamento das áreas queimadas o produto utiliza o modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) para gerar as imagens fração vegetação, solo e sombra com base na coleta dos pixels puros, onde são selecionadas as frações sombra para aplicação de classificação não supervisionada. O produto apresentou acurácia global de 94%.

As características gerais de cada um dos produtos podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição das características dos produtos de área queimada.

Produto	Desenvolvedor	Sensores	Resolução Espacial	Escala	Período	Intervalo de tempo
CBERS	Ferro (2021)	Cbers 4 e 4A (WFI)	64 m	Local (Rondônia)	Mensal	2021
MapBiomass Fogo	MapBiomass	Landsat (TM, ETM+, OLI)	30 m	Brasil	Mensal	1985 - presente
MCD64A1	NASA	MODIS	500 m	Global	Mensal	2000 - presente
Fire_cci	ESA	MODIS	250 m	Global	Anual	2001 - 2020
GABAM	China (RAD/CAS)	Landsat (TM, ETM+, OLI)	30 m	Global	Anual	2000 - presente

Fonte: Autor (2022).

Os produtos MCD64A1 versão 6.0, Mapbiomas Fogo versão 1.0 e GABAM foram acessados através da plataforma GEE. O produto Fire cci versão 5.1 foi obtido por meio do site da ESA, disponível em: <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/58f00d8814064b79a0c49662ad3af537>.

2.2.2 Mapa de Referência

Neste estudo, utilizamos como referência para avaliação a classificação das

áreas queimadas pelo método proposto e demais produtos de área queimada, o conjunto de dados do Multispectral Instrument (MSI) do Sentinel – 2. A constelação do Sentinel – 2 opera com dois satélites conjuntamente, o 2A e 2B, que produzem dados da cobertura terrestre a cada 5 dias, com resolução espacial de 10 m no visível e infra vermelho próximo e de 20 a 60 m nos demais canais espectrais, possuindo ao todo 13 bandas espectrais. Os satélites Sentinel 2A e 2B formam uma missão imageadora do programa GMES (Global Monitoring for Environment and Security) administrada em conjunto pela Comunidade Europeia e a ESA (European Space Agency).

Utilizamos apenas as bandas de 10 m de resolução, e todas as imagens disponíveis do período de junho a dezembro de 2020, para edição manual das áreas queimadas. As imagens foram adquiridas no nível 2A de processamento, o qual garante ortorretificação, correção geométrica e correção para reflectância de superfície (BOA) no site da Agência Espacial Europeia (ESA) (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Como dados auxiliares, também foram utilizados os dados de fogo ativos de todos os satélites disponíveis no banco de dados do BDQueimadas (<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>) para o período de análise, além disso também utilizamos o mosaico das imagens planet de 2020, para auxiliar no mapeamento.

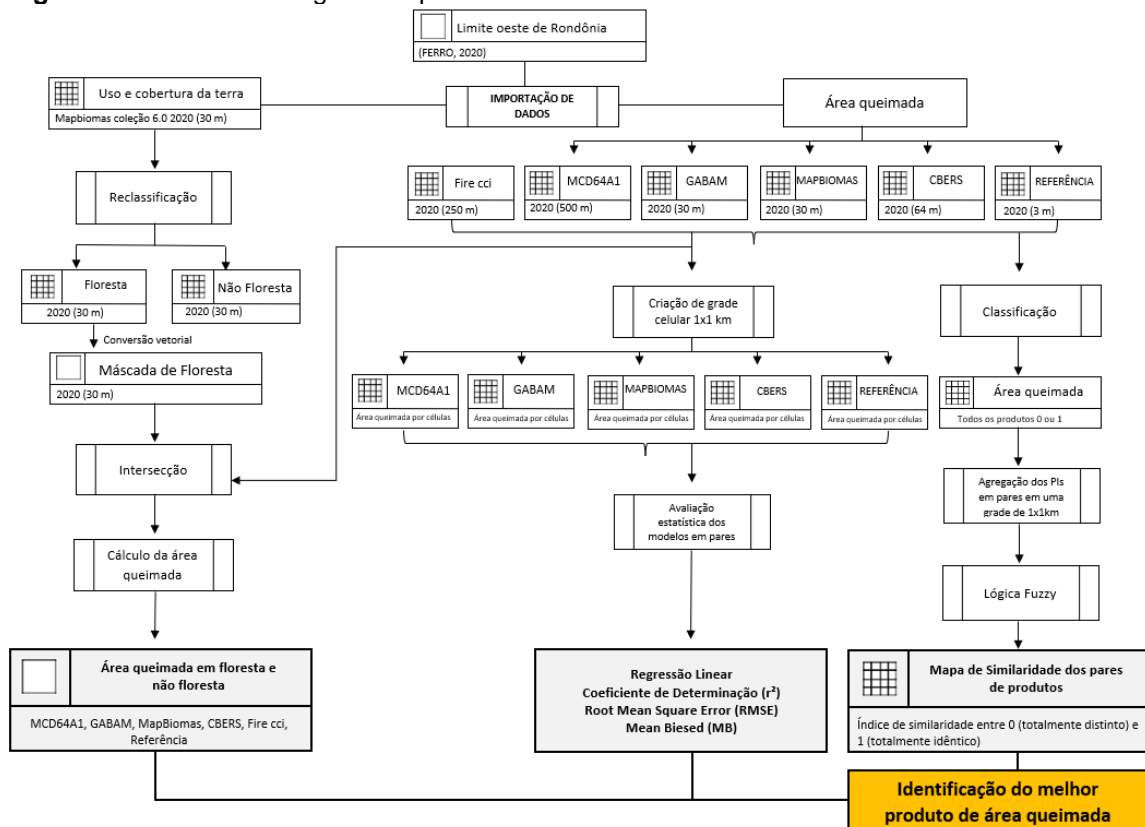
2.2.3. Mapa Florestal e Não Florestal

Para estimar as áreas afetadas pelo fogo sobre áreas florestais e não-florestais, foi utilizado o mapa temático anual de cobertura florestal, gerado a partir dos dados de uso e cobertura da terra do MapBiomass Brazil Collection 6.0 (MAPBIOMAS, 2021), em que foi realizado uma reclassificação das classes gerando uma máscara apenas de floresta. Este conjunto de dados fornece mapas anuais para o Brasil, gerados em uma resolução espacial de 30 m com base na classificação automática pixel a pixel de imagens Landsat usando o algoritmo de aprendizado de máquina Random Forest, implementado na plataforma Google Earth Engine - GEE. Os dados foram adquiridos pelo Toolkit LULC no GEE: <https://code.earthengine.google.com/>

2.3 Visão Metodológica: Avaliação quantitativa, Avaliação Estatística e Análise de Acordos

A metodologia de análise proposta foi adaptada de Shimabukuro et al. (2020) e Pessoa et al. (2020), em que se adotou três critérios de avaliação para identificar qual o melhor produto de área queimada para a área de estudo: a avaliação quantitativa, avaliação estatística e análise de acordos/similaridade. Conforme pode ser visualizada no fluxograma abaixo.

Figura 2- Visão Metodológica dos processamentos



Fonte: Autor (2022).

Para avaliar a relação entre as seis combinações possíveis dos produtos de áreas queimadas, foram realizadas algumas análises e comparações estatísticas, bem como análises dos erros gerados pelos modelos:

- Regressão Linear
- Coeficiente de determinação (r^2)
- Root Mean Square Error (RMSE)
- Mean Biesed (MB)

Nessas análises, os dados dos produtos da área queimada foram incorporados em uma grade regular com uma resolução espacial de 1 por 1 km, geradas no software TerraView 5.6.1. Essa abordagem evita o registro incorreto no cálculo de erros proporcionais para tamanhos de blocos de áreas queimadas, e o viés na estimativa de área queimada presente em mapas de área queimada de resolução grossa a média (ROY et al., 2009). A incorporação levou em conta a proporção do polígono que cai dentro de cada célula da grade. Foram eliminadas da análise as células que não apresentaram detecção de área queimada por nenhum dos produtos de área queimada analisados conjuntamente. Essas análises foram realizadas no software estatístico R.

Ademais, adotamos duas abordagens para as análises do conjunto de dados: a abordagem vetorial, que foi aplicada para avaliar a concordância entre a área total queimada detectada por cada produto, e a abordagem matricial, que foi aplicada para investigar as variações espaciais nesses resultados.

Na abordagem vetorial, a área total queimada foi computada para cada um dos quatro produtos, considerando as classes florestal e não florestal. Esse processamento foi realizado utilizando os softwares QGIS 3.16. Para abordagem matricial, a mesma grade de 1 por 1 km foi utilizada.

Posteriormente, para a comparação espacial, a grade regular foi convertida em arquivos raster com a informação de área queimada para cada produto de área queimada. Tal como na comparação estatística, considerámos apenas as células que apresentavam detecção de queimadas por pelo menos um produto. Os mapas de área queimada foram então comparados dois a dois, usando o método numérico fuzzy implementado na aplicação do Map Comparison Kit 3 (MCK) (VISSER et al, 2006). O método numérico fuzzy leva em conta graus de similaridade entre pares de células em dois mapas numéricos. Embora seja um método de comparação célula por célula, ele considera a vizinhança para expressar a similaridade de cada célula em um valor entre 0 (totalmente distinto) e 1 (totalmente idêntico) (RIKS BV, 2013). A técnica fuzzy permite distinguir diferenças reais, além de dar uma avaliação espacial, esclarecendo não apenas a localização do desacordo, mas também a gravidade (RIKS BV, 2011).

Neste estudo, adotamos uma função de decaimento exponencial com distância

de redução pela metade igual a 2 e consideramos o raio de vizinhança igual a 4. Esta é a configuração padrão para o algoritmo implementado no MCK. No modelo numérico fuzzy, a semelhança de dois valores (a e b) é calculada seguindo a Equação abaixo. A estatística resultante para a semelhança global é então a semelhança média sobre toda a área considerada.

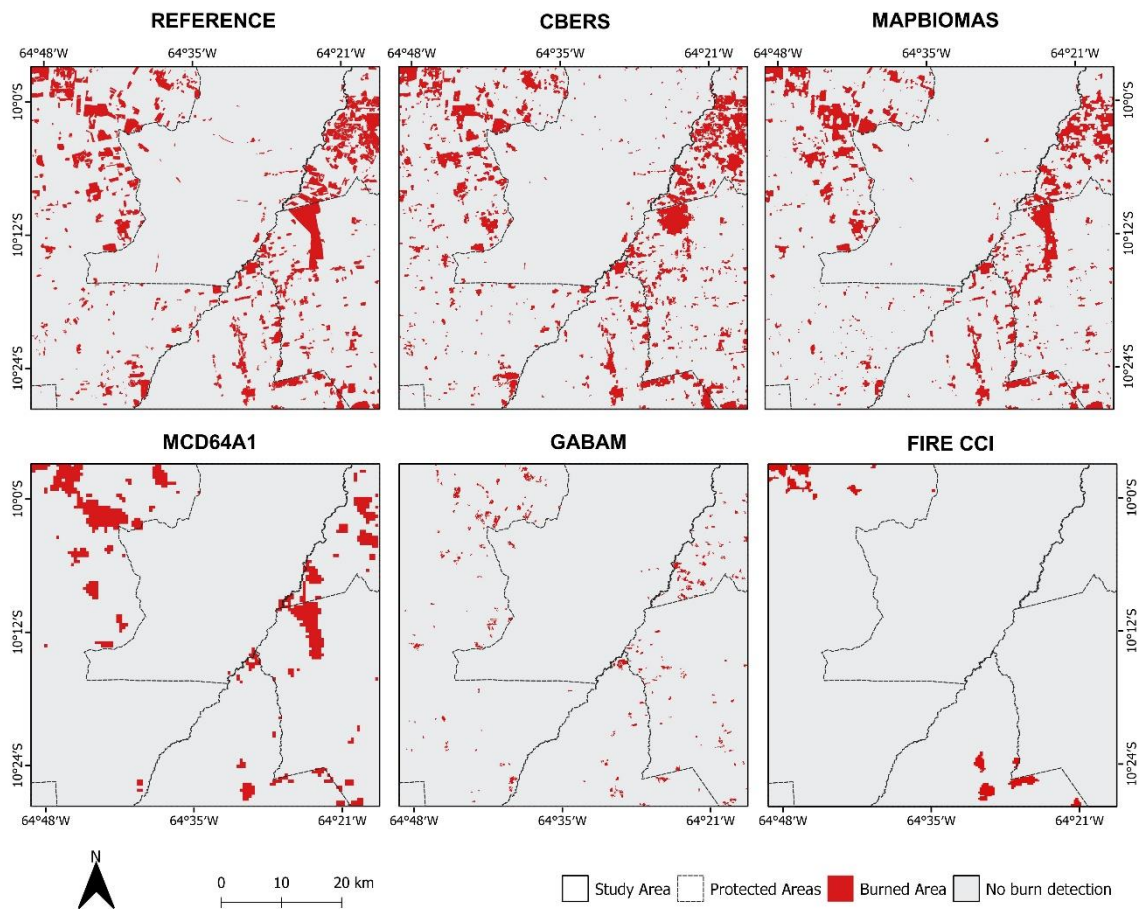
$$S(a, b) = 1 - \frac{|a - b|}{\max |a|, |b|}$$

3 RESULTADOS

3.1 Abordagem Vetorial: Distribuição espacial da área total queimada e estimativas por cobertura terrestre

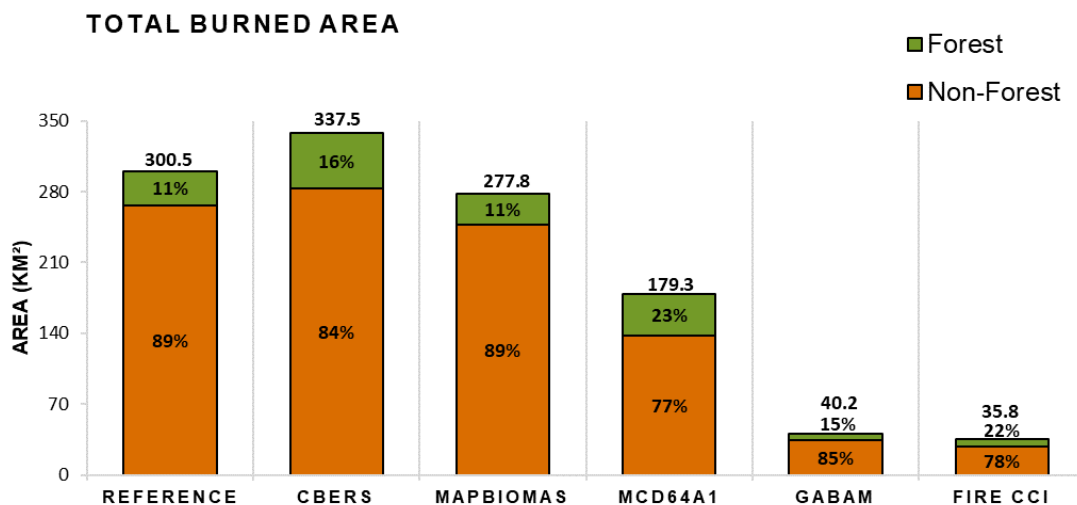
A área total queimada mapeada como referência pelo sensor MSI do Sentinel-2 e Planet, pelos produtos de área queimada CBERS, MapBiomas Fogo MCD64A1, GABAM e Fire cci é mostrada na Figura 3. Os seis produtos analisados diferem de acordo com a área total mapeada. Um total de 300.5 km² de área queimada foi mapeada na referência, o que representa 9,11% da área de estudo, seguido pelo produto CBERS com 337,5 km² da área queimada (10,28% da área de estudo); o MapBiomasFogo com 277,8 km² (8,43%); o MCD64A1 com 179,3 km² (5,44%), GABAM com 40,2 km² (1,2%) e por fim Fire cci com 35,8 km² (1,1%). A diferença mais significativa no total de área queimada detectada na região em relação a Referência ocorre com o produto Fire cci, que subestima 88% de área queimada, seguido do produto GABAM que subestima em 85% e MCD64A1 que subestima em 40%, ao passo que Mapbiomas subestima em 7,5% e CBERS superestima em 12%. Para além, há uma boa concordância visual entre os resultados do conjunto de dados da Referência, CBERS e MapbiomasFogo, no entanto MDC64A1, GABAM e Fire cci apresentam omissão de área queimada em grande parte da área de estudo.

Figura 3- Área total queimada mapeada pelos produtos e sua distribuição espacial: Referência, CBERS, Mapbiomas Fogo, MCD64A1, GABAM e Fire cci.



As estimativas de área queimadas sobrepostas ao conjunto de dados binário da máscara de floresta e não floresta oriundo do MapBiomas (uso e cobertura) são mostradas na Figura 4. Os resultados apontaram que as estimativas de área mais afetadas pelo fogo estão localizadas em áreas não florestais, atingindo 89% (266,21 km²) da área total mapeada pela referência, contra 11% (34,29 km²) em área de florestas. O produto CBERS obteve 16% (54,77 km²) de área queimada de floresta e 84% (284,24 km²) em área de não floresta, o Mapbiomas detectou 11% (30,13 km²) em área queimada de floresta e 89% (247,81 km²) em não floresta, enquanto o MCD64A1 registrou 23% (41,35 km²) em floresta e 77% (138,16 km²) em não floresta, GABAM mapeou 15% (6,03 km²) em floresta e 85% (34,17 km²) em não floresta e por fim o produto Fire cci identificou 22% (7,81 km²) em floresta e 78% em não floresta (27,69 km²).

Figura 4 - Total de área queimada mapeada por Referência, CBERS, MapBiomias, MCD64A1, GABAM e Fire cci sobre coberturas florestais e não florestais, considerando toda a área de estudo.



Regionalmente, MapBiomias e a referência apresentam o mesmo padrão de área queimada tanto sobre florestas quanto não florestas, sendo as florestas do Parque Estadual de Guajará Mirim as mais afetadas pelo fogo. Apesar disso, MapBiomias mapeia 12% a menos de área florestal do que a referência, e 7% a menos de área não florestal. Por outro lado, o CBERS superestima, mapeando 59,7% a mais de área florestal do que a referência, e 6,7% a mais de área não florestal, por outro lado, o MCD64A1 mapeia até 20% a mais de área florestal que a referência e 48% a menos de área não florestal, GABAM mapeia até 82% a menos de área florestal que a referência e 87% a menos de área não florestal, e por fim, Fire cci mapeia até 77% a menos de área florestal que a referência e 90% a menos de área não florestal.

Intercomparando os produtos, MapBiomias mapeia até 45% a menos de área queimada sobre cobertura florestal do que CBERS, e 12,8% a menos sobre não florestas. MCD64A1 também mapeia 24% a menos de área queimada em coberturas florestais do que CBERS, e 51% a menos em áreas não florestais, GABAM e Fire cci mapeiam, 89% e 85%, respectivamente, a menos de área queimada em áreas de florestas em relação ao produto CBERS e 87% e 90%, e a menos em área de não floresta.

3.2 Abordagem Matricial: Avaliação Estatística e Análise de Acordos

Corroborando com as diferenças de magnitude encontradas na análise vetorial, os seis produtos também apresentam divergência espaciais (Figura 5). O produto Fire cci e GABAM são os produtos que mais divergem espacialmente dos demais produtos, apresentando o maior número de células sem detecção de queimadas 1.278 e 1591, respectivamente, (Tabela 2). A Referência, CBERS e MapBiomas apresentam pequenas manchas de áreas queimadas, o que reflete o maior número de células com baixa proporção de cicatrizes de queimadas (entre >0 e 0.1), e inclui um mapeamento mais amplo espacialmente. Embora o CBERS se assemelhe a Referência e MapBiomas quanto a proporção de células queimadas, o produto detectou mais células com área queimada, especialmente ao norte da área de estudo, na Terra Indígena Karipuna. O que pode ser explicado pela classificação de sombras de nuvens como área queimada, tendo em vista que a metodologia do produto utiliza as imagens da fração sombra para identificar as áreas queimadas, havendo alta presença de nuvens na região.

O produto GABAM apresenta a maioria de células queimadas com proporção de até 10%, o que reflete a resolução espacial do produto (30m), que é capaz de mapear pequenos polígonos, no entanto o produto obteve um mapeamento restrito, pouco representativo em relação as queimadas que ocorreram na superfície. Por outro lado o produto MCD64A1 apresentou concentração de células queimadas nas proporções de 20 a 30%, 40 a 50%, 70 a 80% e $>80\%$, devido, especialmente, ao tamanho do pixel do sensor MODIS de 500m, logo um pixel completo dentro da grade regular de 1km ocupa 50%, dois pixels podem ocupar 100%, e caso a detecção seja nos limites com células adjacentes, pode apresentar 25% ou 75% de proporção das células.

Nas áreas queimadas da referência, aproximadamente 88% das células da grade tinham valores até $0,5 \text{ km}^2$. Isto indica que os padrões de área queimada na área de estudo, majoritariamente, correspondem a pequenas cicatrizes (figura 5).

Figura 5- Espacialização da área queimada em uma grade regular de 1 km x 1 km. Cada célula da grade contém a proporção queimada indicada pelo gradiente de cor.

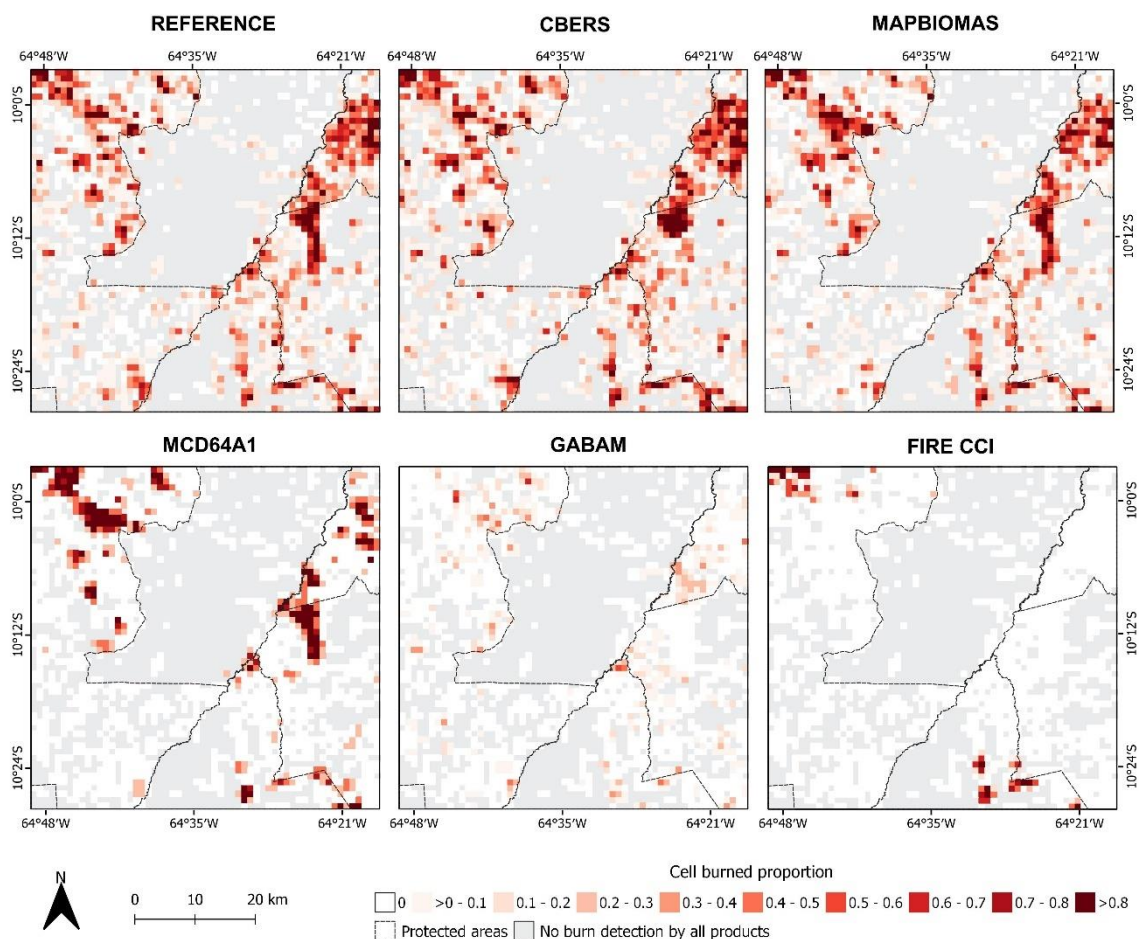


Tabela 2- Número de células em diferentes classes de proporção queimada

Products	0	>0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	>0.8
Reference	403	520	223	141	87	95	64	41	32	62
CBERS	324	545	238	140	99	85	67	51	39	80
MapBiomias	478	542	185	113	85	58	74	43	27	63
MCD64A1	1.359	0	0	115	0	69	0	0	36	89
GABAM	1.278	252	81	32	15	6	2	2	0	0
Fire cci	1.591	8	18	7	4	8	4	7	8	13
Total	5.433	1.867	745	548	290	321	211	144	142	307

Analisando a correlação dada pelos gráficos de dispersão da porcentagem de área queimada por célula, entre os diferentes pares de produtos, observamos que todas as relações são estatisticamente significativas a um nível de confiança de 95% ($p < 0,05$). A relação entre a Referência e Mapbiomas é a mais próxima de 1, seguida pelo CBERS, e a menor relação é com o produto Fire cci (Figura 6). Os coeficientes de determinação são satisfatórios para as comparações MapBiomias (Referência x MapBiomias) e do CBERS (Referência x CBERS), no

entanto foram muito baixos para MCD64A1, GABAM e Fire cci, demonstrando que os modelos explicam pouco o comportamento dos dados (Tabela 3).

Comparando os erros, as medidas de RMSE indicam uma concordância espacial geralmente melhor entre os produtos quando os resultados são menores, sendo utilizadas como um indicador da dispersão ou tendência dos classificadores para identificar a mesma quantidade de área queimadas nas células. O RMSE foi menor para o produto MapBiomas, seguido do CBERS, e elevado para o Fire cci e GABAM. Por outro lado, o MB foi menor para o MapBiomas, seguido do CBERS, e permanecendo mais elevado para o Fire cci e GABAM (Tabela 3).

Figura 6- Avaliação das áreas queimadas mapeadas na Referência (no eixo y) com CBERS (a), MapBiomas Fogo (b), MCD64A1 (c), GABAM (d) e Fire cci (e).

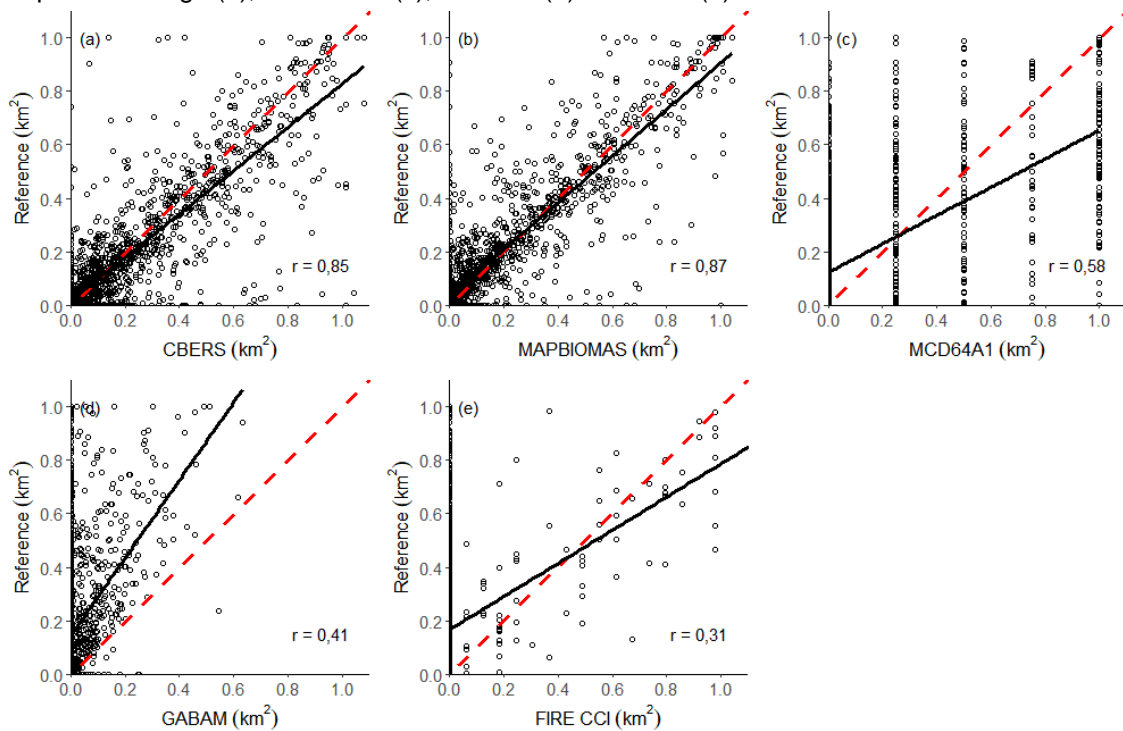


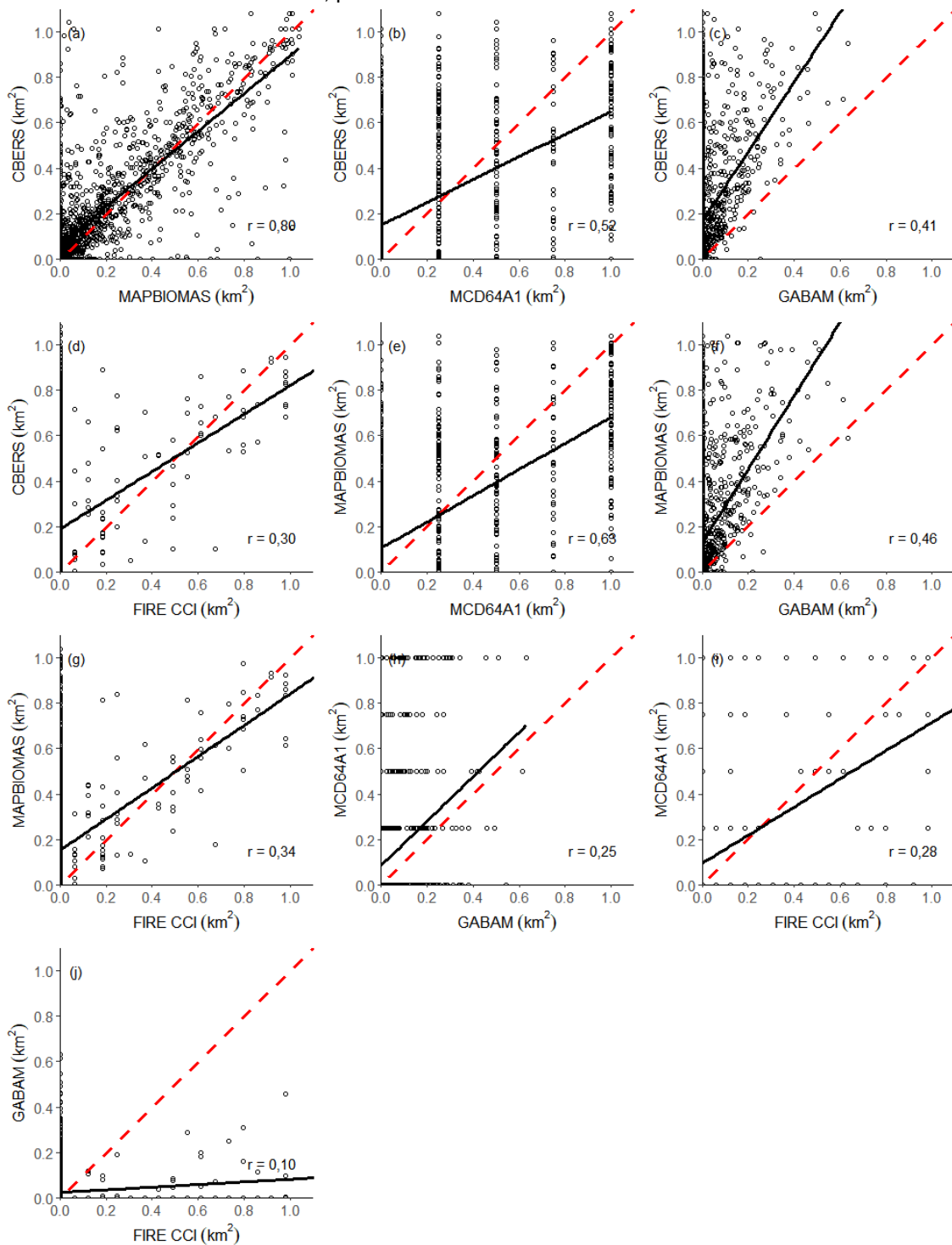
Tabela 3 - Avaliação dos produtos de área queimada.

Model	r²	RMSE	MB	MB (% of observed)
Reference x CBERS	0.718	0.128	-0.022	-12.30
Reference x MapBiomias	0.759	0.118	0.014	7.54
Reference x MCD64A1	0.333	0.197	0.073	40.34
Reference x GABAM	0.168	0.22	0.156	86.61
Reference x Fire cci	0.094	0.229	0.159	88.07
CBERS x MapBiomias	0.633	0.152	0.036	17.67
CBERS x MCD64A1	0.273	0.215	0.095	46.88
CBERS x GABAM	0.172	0.229	0.178	88.08
CBERS x Fire cci	0.090	0.24	0.181	89.38
MapBiomias x MCD64A1	0.394	0.188	0.059	35.48
MapBiomias x GABAM	0.209	0.214	0.142	85.52
MapBiomias x Fire cci	0.116	0.227	0.145	87.10
MCD64A1 x GABAM	0.064	0.253	0.083	77.56
MCD64A1 x Fire cci	0.08	0.251	0.086	80.01
GABAM x Fire cci	0.01	0.068	0.003	10.89

Fonte: Autor (2022).

Analisando a correlação entre os produtos, CBERS e MapBiomias apresentam os valores mais altos, próximo a 1, e a pior correlação verificada ocorre entre GABAM e Fire cci. Também é possível verificar que todos os modelos com os produtos Fire cci e GABAM apresentaram uma baixa correlação, pois os produtos possuem estimativas opostas a referência, enquanto CBERS e Mapbiomias estão mais próximos a referência, Fire cci e GABAM subestimam expressivamente (Figura 7). Este comportamento se repetiu nas demais métricas, como RMSE e MB, o CBERS e MapBiomiasFogo apresentam os menores erros (tabela 4). Embora o modelo GABAM x Fire cci tenha apresentado baixo erro, o coeficiente de determinação também foi muito baixo, o que demonstra que a regressão pouco explica o comportamento dos dados desse produto.

Figura 7- Gráficos de dispersão de regressão por células de grade em comparação com CBERS (a, b, c, d), MapBiomás (e, f, g), MCD64A1 (h, i) e GABAM (j), considerando células de grade com dimensões laterais de 1 km, para obter o r .



A análise de similaridade nos permite identificar os pares de produtos que são os mais coerentes espacialmente. Considerando a área de estudo, os índices de similaridade são considerados médios para CBERS e MapBiomás, comparando-

os com a referência, estando entre 0,6 e 0,7, e considerado baixo para MCD64A1 com 0,4, e baixíssimo para os produtos GABAM e Fire cci (Tabela 4).

Tabela 4 - Semelhança geral para cada par de comparação de produto de área queimada, considerando toda a área de estudo. O índice de similaridade varia de 0 (totalmente distinto) a 1 (totalmente idêntico), e foi calculado usando o algoritmo numérico fuzzy para comparação de mapas.

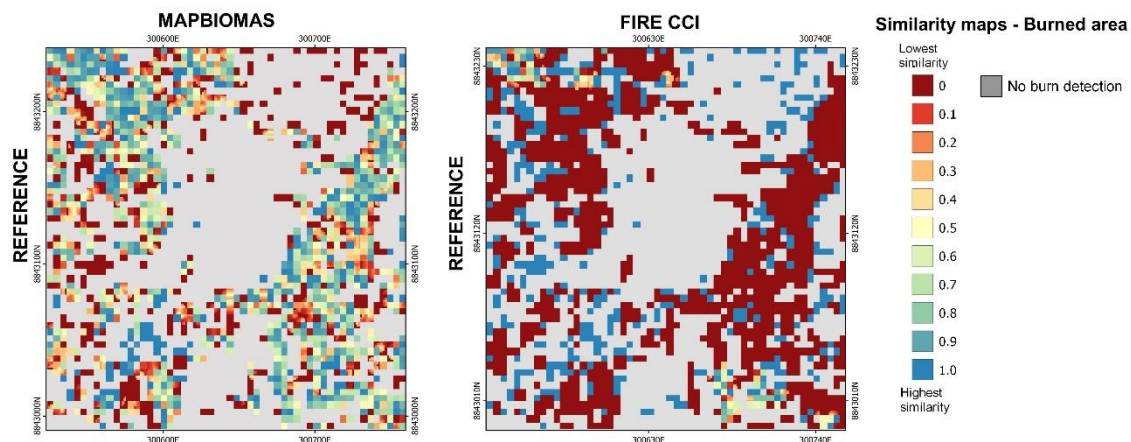
Product combinations	Overall similarity
Reference x Mapbiomas	0,721
Reference x CBERS	0,698
Reference x MCD64A1	0,414
Reference x GABAM	0,332
Reference x Fire cci	0,272
CBERS x MapBiomas	0,751
CBERS x MCD64A1	0,521
CBERS x GABAM	0,282
CBERS x Fire cci	0,229
MapBiomas xMCD64A1	0.489
MapBiomas x GABAM	0.261
MapBiomas x Fire cci	0.202
MCD64A1 x GABAM	0,668
MCD64A1 x Fire cci	0,632
GABAM x Fire cci	0.741

Fonte: Autor (2022)

Ao analisar o MCD64A1, GABAM e Fire cci foi possível observar que os índices de similaridade são claramente inferiores aos demais pares de produtos, indicando uma maior divergência em relação ao conjunto de dados. O que pode ser explicado pela extensão reduzida mapeada pelos produtos MCD64A1, GABAM e Fire cci, considerados conservadores para a região de estudo.

As extremidades da escala de similaridade podem ser observadas espacialmente na figura 8. Essa análise espacial visual permite a identificação das regiões mais coesas ou não, entre os produtos de área queimada. Entre a Referência e Mapbiomas as maiores divergências ocorrem na região oeste e sudoeste da área de estudo, em regiões em que o Mapbiomas mapeou área queimada sobre florestas, principalmente no Parque Estadual de Guajará Mirim. Por outro lado, a Referência e o produto Fire cci apresentam pouca similaridade na maior parte da área de estudo, devido ao baixo desempenho do mapeamento desse produto, embora tenham tipo média similaridade em alguns pares de células observadas na região noroeste da área de estudo, onde não foram registradas queimadas por ambos os produtos, mas o desempenho global na média geral foi considerado baixíssimo.

Figura 8- Mapas de similaridade do melhor e do pior par de comparação de produtos de área queimada. O índice de similaridade foi calculado considerando apenas células que apresentam detecção de área queimada por pelo menos um produto. O índice de similaridade vai de 0 (menor semelhança) destacado por vermelho escuro a 1 (maior semelhança) destacado por azul.



4 DISCUSSÕES

O fogo tem sido a principal ferramenta em atividades de mudanças do uso e cobertura do solo e para o manejo agrícola na região de estudo, estando relacionado, especialmente, ao acelerado processo de desmatamento de áreas protegidas na região nos últimos anos (FERRO, 2021; SANTOS et al., 2021). Os impactos do fogo no ambiente são intensos, tendo em vista que a vegetação Amazônica não é adaptada ao fogo, como em outras regiões, o que afeta áreas sensíveis e traz danos irreparáveis (ARAGAO et al, 2018). Além disso, os impactos das queimadas no clima exigem a análise e monitoramento de grandes extensões territoriais a longo prazo, como é o caso da Amazônia, o que torna fundamental a existência de produtos de áreas queimadas com estimativas fidedignas.

Em regiões tropicais, os sinais das áreas afetadas pelo fogo, podem desaparecer rapidamente, devido a velocidade de regeneração da vegetação e às características climáticas (CANA e CHUVIECO, 2015), o que torna necessário a obtenção de imagens com maior frequência na região. Os produtos de áreas queimadas apresentam limitações a depender da escala de estudo, decorrente das características e especificações inerentes a cada sensor utilizado para gerar o mapeamento das cicatrizes, o que afeta seu desempenho (HUMBER et al., 2018; LAURENT et al., 2018; PESSOA et. al, 2020; SHIMABUKURO et. al, 2020).

O estudo revelou que aproximadamente 10% (305 km²) da área de estudo foi afetada pelo fogo, o que indica 89% (266,21 km²) da área total queimada ocorre em áreas não florestais, evidenciando a maior utilização do fogo em áreas de pastagens e agricultura. Criticamente, as áreas florestais também foram atingidas, onde 11% (34,29 km²) do total de área queimada ocorreu sobre a vegetação nativa, o que traz consequências ambientais e sociais negativas, favorecendo a conversão dessas áreas para o desmatamento, além da transferência de grandes quantidades de carbono para a atmosfera, contribuindo para as mudanças climáticas globais, dado que as florestas tropicais da Amazônia são grandes reservatórios de biomassa e importantes estoques de Carbono (BONAN, et al, 2008; BACCINI et al., 2012; SULLIVAN, et al., 2017; GATTI et al., 2021).

Os resultados mostraram uma boa concordância visual entre os mapas de áreas queimadas produzidos por três conjuntos de dados regionais (Referência, CBERS e MapBiomas), considerando as diferentes metodologias empregadas nos produtos, embora as extensões das áreas queimadas tenham sido diferentes. O produto Fire cci, seguido do GABAM foram os que mais diferiram dos demais conjuntos de dados, apresentando a maior omissão de área queimada (264,7 km² e 260,3 km²), e por fim o produto MCD64A1 que omitiu 121,5 km² da área total queimada na região.

Neste estudo, pudemos avaliar o produto brasileiro local para o estado de Rondônia denominado CBERS, resultante de testes com o composto dos sensores WFI do CBERS 4 e 4A, com uma resolução espacial média (64m) e processados por MLME para gerar os mapas de áreas queimadas, tendo demonstrado ser satisfatório, se aproximando do produto MapbiomasFogo em todos os parâmetros avaliados, embora o Mapbiomas tenha melhor resolução espacial (30 m).

O resultado da avaliação estatística do produto MapbiomasFogo com os dados de referência, apresentou a melhor correlação entre o conjunto de dados ($r = 0,87$), seguido pelo CBERS ($r = 0,85$) e MCD64A1 ($r = 0,58$). Neste contexto, a resolução temporal dos dois sensores do CBERS 4 e 4A em conjunto e aliados a técnica do MLME empregada, poderiam explicar bom desempenho e a

correlação próxima ao do Mapbiomas em relação a referência. Esta análise corrobora por Shimabukuro (2020), onde os autores citam que a maior frequência na aquisição de dados apresenta erros de omissão reduzidos e a técnica da utilização de imagens fração para identificação de áreas queimadas mostram-se vantajosas, ao reduzir o volume de dados a serem analisados e destacar áreas queimadas, facilitando o processo de classificação das imagens. Embora, podemos inferir que o produto CBERS superestima em 12% o total de área queimada, à medida que aumenta a ocorrência de área queimada na região, e devido ao fato de pequenas confusões com sombras de nuvens e corpos d'água, que possuem respostas espectrais semelhantes a área queimada. Por outro lado, o MapBiomas subestima a detecção de áreas queimadas na região, mapeando, em média 7,5% a menos de área queimada que a Referência.

Além disso, ao comparar os dados de referência com os produtos de área queimada operacionais globais (MCD64A1, GABAM e Fire cci) e os regionais (MapBiomas e CBERS), o MapBiomas apresentou o melhor desempenho em todos os parâmetros avaliados e para a grade de 1 x 1km, além de melhorias na definição dos polígonos de área queimada, detectando menores polígonos de cicatrizes, enquanto MCD64A1 e Fire cci apresentaram formação de bordas nos mapeamentos, devido ao tamanho do pixel (500m e 250m), e não conseguiu detectar pequenos polígonos de áreas queimadas fragmentadas na área de estudo. Embora o GABAM tenha detectado pequenos polígonos de área queimada, já que utiliza cenas de 30m no mapeamento, igualmente ao Mapbiomas, não foi capaz de obter um mapeamento amplo sobre a região estudada, obtendo um desempenho muito inferior ao Mapbiomas. Neste contexto, os métodos sofisticados de detecção (aprendizagem de máquina) implementados pelo programa Mapbiomas aliados a resolução espacial do Landsat (30 m) e calibração regional do produto poderiam explicar o melhor desempenho desse produto. Além disso, o produto demonstra vantagens para análises anuais e regionais de áreas queimadas em função da sua longa série temporal, que permite a análise histórica da dinâmica do fogo na região. No entanto, estudos preliminares em outras regiões do Brasil, na região Sudeste e

Centro Oeste indicam baixo desempenho do produto Mapbiomas Fogo para detecção de áreas queimadas.

Outrossim, atualmente, os dados do MODIS têm sido amplamente utilizados na detecção de áreas queimadas por diversos países (LASKO, 2019; RIBEIRO et al., 2022). E apesar da resolução espacial grosseira, e omissão de áreas queimadas na área de estudo, o MCD64A1 utiliza dados integrados de mudanças da reflectância de superfície com observações ativas de fogo como amostras de treinamento, o que melhora o desempenho do produto, e a sua resolução temporal diária assegura uma maior frequência de aquisição de dados, demonstrando ser eficiente na identificação de áreas queimadas em regiões nubladas, como é o caso da Amazônia (HUMBER et al, 2019). Em um estudo regional realizado por Shimabukuro et al., (2020), os autores inferiram que para o estado do Mato Grosso, o produto global MCD64A1 foi inferior ao produto Firecci. Por outro lado, no estudo realizado por Pessoa et al. (2020), os autores identificaram que o produto MCD64A1 obteve melhor desempenho que outros produtos globais na maioria dos estados da Amazônia.

Assim, regionalmente, a integração de dados de diferentes produtos de áreas queimadas pode ser uma alternativa para melhorar as estimativas de áreas queimadas na Amazônia, quando se utiliza produto globais, como MCD64A1. Uma vez que, corroborando com os autores (ROY, BOSCHETTI, 2009), um fator determinante na precisão da detecção da área queimada é a maior resolução espacial, o que produzem menores erros de omissão.

Ademais, o resultado da comparação entre conjuntos de dados diferentes e a obtenção de padrões totalmente distintos, como foi o caso dos produtos globais Fire cci e GABAM, que mais divergiram dos demais produtos, tanto quantitativamente, como espacialmente corroboram com resultados de outros estudos regionais. Pessoa et al. (2020), ao intercomparar diferentes produtos de área queimada para a Amazônia em 2015, observou que os produtos GABAM e Fire cci obtiveram um desempenho global inferior ao MCD64A1 e TREES, subestimando áreas queimadas em vários estados da Amazônia. Lizundia-Loiola et al., (2020), obtiveram resultados semelhantes para o produto Fire cci ao avaliarem o desempenho da nova versão do produto para a América do Sul

(versão 5.1), em que apresentou erros de omissão e comissionamento semelhante a versão anterior, mesmo tendo aprimorado o algoritmo de detecção, á medida que detectou menos área queimada do que o produto MCD64A1 entre o período de 2005 a 2011.

Portanto, apesar da contribuição significativa destes produtos globais para a modelagem do fogo com base na análise global da área queimada, e apresentando bom desempenho em outros países, mostramos que, regionalmente, para a área de estudo em Rondônia, o uso destes produtos pode ser crítico na subestimação da área queimada em geral e, conseqüentemente, dos impactos relacionados ao fogo sobre as emissões de carbono.

Por fim, existe padrões semelhantes entre os produtos da Referência com o CBERS e com MapBiomas, o que os tornam mais fiáveis. Na ausência de um produto nacional oficial para monitoramento de longo prazo da extensão de florestas degradadas pelo fogo, a utilização do produto Mapbiomas e CBERS oferecem uma opção mais confiável regionalmente, para expor a magnitude das perdas socioeconômicas e ambientais relacionadas ao fogo na região de estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de produtos de detecção remota de áreas queimadas requer estimativas fidedignas. A produção de dados oficiais pelo Brasil, com resolução espacial mais fina, para monitorar suas áreas queimadas, mensurar os impactos socioambientais relacionados o fogo e as contribuições para emissão de carbono, é uma tarefa a ser implementada.

Regionalmente, os produtos regionais MapbiomasFogo e CBERS sobressaíram aos demais produtos de área queimada globais, e são os produtos mais parecidos entre si e mais próximos da referência. Dos parâmetros analisados neste estudo, tanto sobre área de floresta, quanto não - floresta, o produto regional Mapbiomas Fogo obteve o melhor desempenho, no entanto subestimou o total de área queimada em 7.5%. O produto regional CBERS, embora tenha superestimado em média 12% área queimada, possui resolução espacial mais grosseira que o Mapbiomas, e obteve desempenho semelhante, o que traz boas perspectivas para novos estudos, podendo melhorar suas estimas à medida que utilize um acervo de imagens mais amplo e haja integração com outros sensores AWFI.

Contabilizando a magnitude da diferença, os produtos mais parecidos na subestimação de área queimada foram os produtos globais Fire cci e GABAM, sendo o que mais divergiu significativamente foi Fire cci subestimando 88% das áreas queimadas na região, seguido do GABAM que omitiu 85% de áreas queimadas, e por fim o MCD64A1, que subestimou em média 40%. Os produtos que mais divergiram entre si foram CBERS e Fire cci, a diferença entre os dois pode chegar a 90% menos área queimada detectada pelo Fire cci na região de estudo. Em geral, os produtos globais utilizados em escala regional podem subestimar significativamente os impactos do fogo e, conseqüentemente, as emissões de carbono relacionadas com o fogo.

Por fim, todos os produtos de área queimada apresentaram limitações e discrepâncias, nenhum deles é o retrato fiel dos processos que ocorrem na superfície, embora os produtos regionais sejam os mais fidedignos com a realidade. A escolha do produto a ser adotado como fonte de entrada para estimativas de emissão de Carbono influenciará as taxas de emissão. Assim, o

usuário final deve escolher o produto com base no fenômeno e na escala a ser estudada, considerando as limitações conferidas por cada produto. Além disso, envolver a fusão de mais de um produto para otimizar suas vantagens em busca de dados mais consistentes pode ser uma alternativa.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A. A. C., et al. Long-Term Landsat-Based Monthly Burned Area Dataset for the Brazilian Biomes Using Deep Learning. **Remote Sensing**. V. 14, N. 11, 2022.
- ANDELA, N. et al. The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed, and direction. *Earth System Science Data Discussions*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.earth-syst-sci-data-discuss.net/essd-2018-89/>>.
- ANDERSON, L.O.; et al. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, 35, 445–456. 2005.
- ANDERSON, L. O. et al. Counting the costs of the 2005 Amazon drought: A preliminary assessment, in *Ecosystem Services for Poverty Alleviation in Amazonia*. In: MEIR, P. (Ed.). **Ecosystem Services for Poverty Alleviation in Amazonia**. Edinburgh. p. 96–108. 2011.
- ANDERSON, L. O.; et al. Disentangling the contribution of multiple land covers to fire-mediated carbon emissions in Amazonia during the 2010 drought. **Glob. Biogeochem. Cycles**. v. 29, p. 1739–1753. 2015.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, vol. 9, n. 1, p. 536, 2018.
- BARLOW, J. et al. The critical importance of considering fire in REDD+ programs. **Biological Conservation**, v. 154, p. 1–8, 2012.
- BACCINI, A., et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Clim Change**. v. 2, p. 182–185, 2012.
- BRANDO, P. M. et al. Prolonged tropical forest degradation due to compounding disturbances: Implications for CO₂ and H₂O fluxes. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 2855–2868, 2019. a
- BRANDO, P. M., et al. Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**. v. 47, n. 1, p. 555–581, 2019. b
- BDC. Brazil Data Cube. Disponível em: <http://brazildatacube.org/>. Acessado em: 15 de dez de 2021.
- BONAN, G. B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. **Science**. v. 320, p. 1444–1449. 2008.

CAMPANHARO, W. et al. Translating Fire Impacts in Southwestern Amazonia into Economic Costs. **Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 764, 2019.

CANAS, I. A.; CHUVIECO, E. Global burned area mapping from ENVISAT-MERIS and MODIS active fire data. **Sensoriamento Remoto Ambiente**. 2015, 163, 140–152.

CASTILHO, E. B.; et. Al. Monitoring Wildfires in the Northeastern Peruvian Amazon Using Landsat-8 and Sentinel-2 Imagery in the GEE Platform. **Geo-Information**, v. 9, p. 564, 2020.

CHUVIECO, E. et al. Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire. **Global Ecology and Biogeography**, v. 23, n. 2, p. 245–258, 2014.

CHUVIECO, E., et al. Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250 m reflectance bands and thermal anomalies. **Earth System Science Data**, v.10, n.4, p. 2015-2031. 2018.

CHUVIECO, E. et al. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. **Remote Sensing of Environment**, v. 225, p. 45–64, 2019.

DAVIDSON, E., et al. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, p. 321–328. 2012.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 680–688, 2005.

FERREIRA, K. R.; et al. Earth observation Data Cubes for Brazil: Requirements, Methodology and Products. **Remote Sensing**. v.12, p. 4033. 2020.

FERRO, P. D. Estimativas de desmatamento e queimadas em tempo quase real na Amazônia Sul Brasileira: um passo para popularização de dados. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia-INPA, Manaus. 60p. 2021.

GATTI, L. V; et al. A Amazônia como fonte de carbono ligada ao desmatamento e às mudanças climáticas. **Nature**. v. 595, p. 388–393. 2021.

GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D. P.; HUMBER, M. L.; JUSTICE, C. O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 72-85, 2018.

HOOD, S. M., et al. Fire and tree death: understanding and improving modeling of fire-induced tree mortality. **Environmental Research Letters**, n. 13, v. 11, p.113004, 2018.

HUMBER, M. L.; et al. Spatial and temporal intercomparison of four global burned area products. **Int. J. Digital Earth**. 2019, v 12, 460–484.

JUÁREZ-OROZCO, S. M.; SIEBE, C.; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, D. Causes and Effects of Forest Fires in Tropical Rainforests: A Bibliometric Approach. **Tropical Conservation Science**, v. 10, 2017.

LASKO, K. Incorporating Sentinel-1 SAR imagery with the MODIS MCD64A1 burned area product to improve burn date estimates and reduce burn date uncertainty in wildland fire mapping. *Geocarto International*, v. 36, n. 3, p. 340-360. 2019.

LAURENT, P., et al. FRY, a global database of fire patch functional traits derived from space-borne burned area products. **Sci Data**. v. 5, p.180132, 2018.

LIZUNDIA-LOIOLA, J., et al. A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 236, p.111493, 2020.

LONG, T.; et al. 30 m Resolution Global Annual Burned Area Mapping Based on Landsat Images and Google Earth Engine. **Remote Sensing**. v.11, n. 489, 2019.

MapBiomias Brasil. Projeto MapBiomias - Collection 6.0 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil. Disponível em: https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR. Acessado em 04 de novembro de 2021.

MATAVELI, G. A. V., et al. Relationship between Biomass Burning Emissions and Deforestation in Amazonia over the Last Two Decades. **Forests**, v. 12, n. 9, 2021.

MATRICARDI, E. A. T. et al. Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 369, n. 6509, p. 1378-1382, 2020.

MORTON, D. C., et al. Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, v.14. 2008.

MÜLLER, C. **Brazil and the amazon rainforest: deforestation, biodiversity and cooperation with the EU and international forums. European parliament**. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=IPOL_IDA\(2020\)648792](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document.html?reference=IPOL_IDA(2020)648792). Acessado em: 02 jul. 2021. 2020.

OLOFSSON, P., et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. **Remote sensing of environment**. v. 148. P. 42- 57. 2014.

PESSÔA, A. C. M., et al. Intercomparison of Burned Area Products and Its Implication for Carbon Emission Estimations in the Amazon, **Remote Sensing**, v. 12, p. 3864, 2020.

PIVELLO, V. R.; et al. Understanding Brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in ecology and conservation**, v. 19, p. 233-255, 2021.

RIBEIRO, M.C., et al. The Brazilian Atlantic Forest: a shrinking biodiversity hotspot. In: Zachos, F.E., Habel, J.C. (Eds.), **Biodiversity Hotspots**. Springer, Heidelberg, pp. 405-434. 2011.

RIKS BV. Map Comparison Kit 3: User Manual; RIKS BV: Maastricht, The Netherlands, 2013.

RIKS BV. MCK Reader: Methods of the Map Comparison Kit; RIKS BV: Maastricht, The Netherlands, 2011.

ROY, D. P.; BOSCHETTI, L. Southern Africa Validation of the MODIS, L3JRC, and GlobCarbon Burned-Area Products. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.** **2009**, 47, 1032–1044.

SANTOS, A. M. d., et al. "Dynamics of active fire data and their relationship with fires in the areas of regularized indigenous lands in the Southern Amazon." **Remote Sensing Applications: Society and Environment**. v. 23, 2021.

SHI, Y.; MATSUNAGA, T.; YAMAGUCHI, Y. High-Resolution Mapping of Biomass Burning Emissions in Three Tropical Regions. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 18, p. 10806–10814, 15 set. 2015.

SHIMABUKURO, et al. Mapping Burned Areas of Mato Grosso State Brazilian Amazon Using Multisensor Datasets. **Remote Sensing**, v. 12, p. 3827, 2020.

SHIMABUKURO, Y. E.; PONZONI, F. J. Mistura espectral: modelo linear e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SHIMABUKURO, Y. E.; PONZONI, F. J. Mistura espectral: modelo linear e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16–20, 1991.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16–20, 1991.

SILVA JUNIOR, C. H. L. et al. Fire Responses to the 2010 and 2015/2016 Amazonian Droughts. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, n. 97, p. 1–16, 2019.

SULLIVAN, M.J.P.; et al. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. **Scientific Reports**. v. 7, 2008.

VEENENDAAL, E. M. et al. Structural, physiognomic and above-ground biomass variation in savanna–forest transition zones on three continents – how different are co-occurring savanna and forest formations?. **Biogeosciences**, v. 12, n. 10, p. 2927–2951, 2015.

VISSER, H.; DE NIJS, T. The Map Comparison Kit. **Environ. Model. Softw.** V. 21, 346–358. 2006.