

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, HUMANAS E SOCIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

José Wagner Oliveira Júnior

**EMISSIONES DE METANO DECORRENTES DA EXPANSÃO DE
ÁREAS DE SOJA NO CERRADO BRASILEIRO**

**SINOP
MATO GROSSO - BRASIL
2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, HUMANAS E SOCIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

José Wagner Oliveira Júnior

**EMISSIONES DE METANO DECORRENTES DA EXPANSÃO DE
ÁREAS DE SOJA NO CERRADO BRASILEIRO**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio da Silva Junior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso, Câmpus Universitário de Sinop, na área de concentração Biodiversidade e Bioprospecção, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Linha de pesquisa: Recursos Naturais.

**SINOP
MATO GROSSO - BRASIL
2023**

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

O48e Oliveira Júnior, José Wagner.

Emissões de metano decorrentes da expansão de áreas de soja no cerrado brasileiro [recurso eletrônico] / José Wagner Oliveira Júnior. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 59 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Carlos Antonio da Silva Junior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Naturais, Humanas e Sociais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Sinop, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

FOLHA DE APROVAÇÃO

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "Emissões de metano decorrentes da expansão de áreas de soja no cerrado brasileiro"

AUTOR (A): Mestrando José Wagner Oliveira Júnior

Dissertação defendida e aprovada em 15/02/2023.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Presidente Banca / Orientador Doutor(a) Carlos Antonio da Silva Junior

Instituição : UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO

2. Examinador Interno Doutor(a) FELIPE FERRAZ VAZQUEZ

Instituição : UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. Examinador Externo Doutor(a) Baltazar Casagrande

Instituição : Escola Estadual Enio Pipino – Secretaria de Estado

4. Examinador Externo Doutor(a) Mendelson Guerreiro de Lima

Instituição : Universidade do Estado de Mato Grosso

5. Examinador Suplente Doutor(a) Guilherme Fernando Capristo Silva

Instituição : PNPD - Programa Nacional de Pós-doutorado

SINOP, 15/02/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Antonio da Silva Junior**, **Usuário Externo**, em 16/02/2023, às 10:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FELIPE VAZQUEZ, Usuário Externo**, em 16/02/2023, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Baltazar Casagrande, Usuário Externo**, em 23/02/2023, às 11:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mendelson Guerreiro de Lima, Usuário Externo**, em 24/02/2023, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5529254** e o código CRC **F0B4B551**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu gostaria de agradecer a Deus pela vida e oportunidades recebidas diariamente.

Eu gostaria de agradecer aos meus pais, José Wagner e Lucilene, pela educação e suporte durante todas as etapas da minha graduação e Pós-Graduação. A minha irmã Lara que me ajudou nos momentos mais difíceis, sem ela não teria chegado até aqui. Eu devo minha eterna gratidão para vocês, tenho sorte pela família que eu tenho.

Também devo minha gratidão ao meu orientador e amigo Carlos, pelo conhecimento e conselhos repassado durante esses anos de orientação. Obrigado pela oportunidade da conquista deste título.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, Fernando, Tatiane e João Lucas, que me ajudaram nesse processo com dicas e opiniões sobre como melhorar meu estudo, o companheirismo no laboratório e a amizade formada nesse período.

Quero agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso – FAPEMAT no financiamento dessa pesquisa. Este trabalho contribuiu para a pesquisa científica gerando conhecimento sobre a evolução do uso do solo no estado de Mato Grosso e as mudanças climáticas.

RESUMO

O Mato Grosso (MT) é o estado com maior produção de soja no Brasil, concentrada principalmente em suas áreas no bioma Cerrado. Naturalmente, o Cerrado e sua vegetação nativa são adaptadas ao fogo. Os incêndios são uns dos grandes vetores na emissão de gases de efeito estufa (GEE), com os incêndios que ocorrem no Cerrado contribuindo significativamente nas emissões de metano (CH_4). Neste estudo, foram quantificados os focos de incêndio, áreas de vegetação nativa e as cultivadas com soja do Cerrado do MT. Posteriormente foram analisadas as emissões (CH_4), os valores de *Gross Primary Production* (GPP) e classificação do *Standard Precipitation Index* (SPI), para todo o Cerrado do MT. Para a classificação das áreas de vegetação nativa foi utilizado o classificador *Random Forest* em imagem do satélite obtidas pelo sensor OLI/Landsat-8. Para a detecção das áreas de soja foi aplicado PCEI (*Perpendicular Crop Enhancement Index*) nas imagens OLI/Landsat-8 e o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Os dados de focos de incêndio foram obtidos através da plataforma *Fire Information for Resource Management System*. Para a detecção dos dados de metano CH_4 , foram utilizados dados do sensor TROPOMI acoplado ao satélite Sentinel-5P. O GPP foi obtido a partir do sensor MODIS pelo produto MOD17A2H. Os resultados mostram que foi detectada uma diferença na quantidade de área de vegetação nativa entre os anos de 2020 e 2021 de aproximadamente um milhão de hectares (Mha), onde 12,5 Mha foram detectados em 2020 e 11,4 Mha em 2021. Já para as áreas de soja no ano safra 2020/2021 foi identificada uma área de cultivo com 6,1 Mha, passando para 6,5 Mha no ano safra 2021/2022. Os valores registrados para as emissões de metano foram, respectivamente, de $12,2 \text{ T mol/ m}^{-2}$ para 2020 e $15,5 \text{ T mol/ m}^{-2}$ para 2021. Os registros de GPP foram de $11,61 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para 2020 e de $11,07 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para 2021. O SP1-12 classificou a área de estudo de 2020 como extremamente seca. Os valores médios para as áreas de expansão agrícola onde houve desmatamento pelo método de queimadas, demonstraram que em 2021 ocorreram maiores concentrações de CH_4 por ponto.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Agricultura, TROPOMI, Gases de Efeito Estufa, Queimadas.

ABSTRACT

Mato Grosso (MT) is the state with the largest soybean production in Brazil, concentrated mainly in its areas in the Cerrado biome. Naturally, the Cerrado and its native vegetation are adapted to fire. Fires are one of the major vectors in the emission of greenhouse gases (GHG), with fires occurring in the Cerrado contributing significantly to methane (CH₄) emissions. In this study, fire outbreaks, native vegetation areas and areas cultivated with soybean in the Cerrado of MT were quantified. Subsequently, emissions (CH₄), Gross Primary Production (GPP) values and Standard Precipitation Index (SPI) classification were analyzed for the entire Cerrado of MT. For the classification of native vegetation areas the Random Forest classifier was used on satellite images obtained by the OLI/Landsat-8 sensor. For the detection of soybean areas, PCEI (Perpendicular Crop Enhancement Index) was applied on OLI/Landsat-8 and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) images. Fire outbreak data were obtained through the Fire Information for Resource Management System platform. For CH₄ methane data, data from the TROPOMI sensor attached to the Sentinel-5P satellite were used. GPP was obtained from the MODIS sensor by the MOD17A2H product. The results show that a difference was detected in the amount of native vegetation area between the years 2020 and 2021 of approximately one million hectares (Mha), where 12.5 Mha were detected in 2020 and 11.4 Mha in 2021. For soybean areas in the crop year 2020/2021 a cultivated area of 6.1 Mha was identified, increasing to 6.5 Mha in the crop year 2021/2022. The values recorded for methane emissions were 12.2 T mol/ m² for 2020 and 15.5 T mol/ m² for 2021, respectively. The GPP records were 11.61 g C m⁻² d⁻¹ for 2020 and 11.07 g C m⁻² d⁻¹ for 2021. SP1-12 classified the 2020 study area as extremely dry. The mean values for the agricultural expansion areas where there was deforestation by the burning method showed that higher CH₄ concentrations per point occurred in 2021.

Keywords: Remote Sensing, Agriculture, TROPOMI, Cerrado, Greenhouse Gases, Burning.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

a – Ano

C – Carbono

CART – Classification and Regression Tree

CHIRPS – Climate Hazards Group Infrared Precipitation

CO₂ – Dióxido de Carbono

d – Dia

g – Grama

GEE – Gases de Efeito Estufa

GPP – Gross

ha – Hectares

k - Quilo

M – Mega (1×10^6)

M – Metro

m² – Metro quadrado

MODIS – Moderate Operacional

mol – Quantidade de matéria

MT – Mato Grosso

N₂O – Óxido Nitroso

P – Peta (1×10^{15})

PCEI – Perpendicular Crop Enhancement Index

PVI – Perpendicular Vegetation Index

SPI – Standart

SR – Sensoriamento Remoto

T – Tera (1×10^{12})

t – Toneladas

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	11
CAPÍTULO I.....	16
Desmatamento Direto Para Produção de Soja No Cerrado do Mato Grosso: Emissões de CH ₄ e Impactos Causados	16
Resumo:	17
Abstract.....	17
1. Introdução	18
2. Materiais e Métodos.....	19
2.1 Caracterização e localização geográfica	19
2.2 Focos de incêndio	22
2.3 Áreas nativas	22
2.3.1 Classificação Supervisionada de Imagem	22
2.4 Áreas de soja	26
2.4.1 Cálculo dos Índices de Vegetação	26
2.5 Emissões de Metano	27
2.6 Gross Primary Production.....	28
2.7 Índice de Precipitação Padronizada de Chuva	29
2.8 Análise estatística	30
3. RESULTADOS	30
3.1 Vegetação nativa.....	30
3.2 Focos de incêndio	31
3.3 Áreas de Soja.....	32
3.4 Pontos de Interesse	33
3.5 Fração molar da coluna de metano	34
3.6 <i>Gross Primary Production</i>	36

3.7 Índice de Precipitação Padronizada	38
3.8 Análise e interpretação dos dados	40
4. Discussão.....	42
5. Conclusão	46
6. Recomendações futuras.....	47
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICE (S)	56

INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil tem a soja como a principal cultura comercial em termos de área plantada, produção e valor econômico (Piras et al., 2021). Segundo a Conab (2022), a área plantada da safra de 2021/2022 foi aproximadamente de 41.4 milhões (M) de hectares (ha), e com uma produtividade de 139,3 M de toneladas (t). A maior parte dessa produção se encontra no estado do Mato Grosso (MT), que detém 30% da produção nacional (Areas et al., 2022). Segundo o SojaMaps (2022), na safra de 2021/2022, a área de cultivo da soja no MT foi de aproximadamente 11.6 Mha. O Norte do MT é a região com a maior quantidade de área plantada, com aproximadamente 7,2 Mha (62%), seguido pelo Nordeste do MT com 2,2 Mha (19%), Sudeste 1,6 Mha (14%), Sudoeste 308 mil ha (3%) e Centro-Sul do MT com 203 mil ha (2%). O SojaMaps também destaca a maior produção de soja no bioma Cerrado 6,6 Mha, seguido pela Amazônia com 5 Mha e 21 mil ha no Pantanal.

A expansão da soja no estado do MT foi sobre dois importantes biomas, a Amazônia (Lourençoni et al., 2021) e o Cerrado (Silva Junior et al., 2020; Zu Ermgassen et al., 2020). O Cerrado está entre os *hotspots* globais para a conservação da biodiversidade (Schmidt e Eloy, 2020; Strassburg et al., 2017), o que significa que já perdeu 70% de sua vegetação nativa, colocando em risco mais de 1200 espécies endêmicas (Habel et al., 2019). Apesar disso, este bioma tem apenas 13% do seu território protegido por leis e acordos ambientais (Soterroni et al., 2019). Esta condição se deve à agropecuária, que é a principal atividade econômica dentro do seu limite biogeográfico (Klink et al. 2020). Esta dinâmica se relaciona a maiores taxas de desmatamento (Trigueiro et al., 2020), assim como faz deste bioma o mais afetado por incêndios (Silva Junior et al., 2020).

O Cerrado naturalmente é propenso e dependente do fogo, onde sua flora se caracteriza pela adaptação ao fogo (Cassino et al., 2020). Nesse bioma, os incêndios desempenham importantes serviços ecossistêmicos, como por exemplo a quebra de dormência de sementes (Pausas e Lamont, 2022). A expansiva mudança do uso do solo, principalmente para a agricultura, mudou consideravelmente a frequência das queimadas no bioma (Schmidt e Eloy, 2020), uma vez que as ações antrópicas modificam a paisagem, alterando a quantidade da biomassa, o tempo de ignição, o número, a frequência e a sazonalidade de focos de incêndios (Archibald, 2016; Bowman et al., 2009; Cassino et al., 2020).

Estes fatores também são bastantes influenciados pelas mudanças climáticas, que impulsionam eventos mais extremos, como anos com chuvas intensas, seguidos de secas

severas. Essas condições proporcionam o crescimento da vegetação e o acúmulo de biomassa combustível (Magro et al., 2021), favorecendo a ocorrência de grandes incêndios (Adame *et al.*, 2018).

No processo de combustão da matéria orgânica, ocorre a oxidação e degradação acelerada da vegetação viva ou morta (Magro et al., 2021). Nesse processo, da queima completa ou incompleta da biomassa, é liberada uma grande variedade de gases de efeito estufa (GEE) (Ribeiro-Kumara et al., 2020). Consequentemente, os incêndios alteram a qualidade do ar local e globalmente, pois são a principal fonte de emissões de aerossóis, carbonáceos, dióxido de carbono, óxido de nitrogênio, metano, entre outros gases de efeito estufa (Andreae e Merlet, 2001; Li et al., 2018). As queimadas em sistemas agrícolas e incêndios florestais emitiram uma média de 2,2 PgC a⁻¹ nas últimas duas décadas (UNFCCC, 2017), o que significou cerca de 25% das emissões globais de GEE (van der Werf et al., 2017).

Entre os GEE, o CH₄ tem uma grande importância, visto que é o segundo gás com o maior teor atmosférico, aproximadamente 1,8 ml m⁻³ (Dlugokencky et al., 2011). Também é o gás com maior poder de aquecimento da atmosfera, uma relação de 28 vezes mais agressivo às temperaturas globais em relação ao CO₂ (maior responsável da crise climática atualmente), se comparados em um período de 100 anos (Stocker et al., 2014).

O Brasil é responsável por 5,5% das emissões de CH₄ em todo o planeta, o que o torna o quinto país com a maior quantidade de CH₄ emitido globalmente. Em 2021 na COP26, em Glasgow na Escócia, o Brasil assinou o Compromisso Global do Metano (*Global Methane Pledge*) onde declarou colaborar para reduzir as emissões de CH₄ em 30%, com base nas emissões de 2020 (Alencar et al., 2022). De mesmo modo quando se comprometeu em 2015 no acordo de Paris, em reduzir as emissões de GEE em 37% até 2025 e 43% até 2030 (Lima et al., 2020).

A estratégia de priorizar o metano para a mitigação da emissão de GEE é baseado em suas características, por ser um gás de curta permanência na atmosfera (menor que 20 anos) e de maior potencial de aquecimento do que o CO₂, por isso, as reduções de emissões de metano podem impactar de modo acelerado nas mudanças climáticas em nível global, evitando o aquecimento de 1,5° C estabelecido no Acordo de Paris (Alencar et al. 2022). A forma de monitorar a alteração da quantidade de gases presentes na atmosfera pode ser por meio de sensores, principalmente os orbitais, que conseguem ampliar a área de estudo, principalmente quando se trata de questões globais.

Para a observação dos 35.9 Mha de área do Cerrado do MT, com base nas ferramentas disponíveis atualmente, o sensoriamento remoto é o mais viável pela capacidade de obtenção de dados em grande escala e excelente acurácia dos dados. Em vista disso, o objetivo deste trabalho foi analisar as emissões de metano para a atmosfera resultantes da expansão agrícola via sensores orbitais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adame, J. A., Lope, L., Hidalgo, P. J., Sorribas, M., Gutiérrez-Álvarez, I., del Águila, A., et al. (2018). Study of the exceptional meteorological conditions, trace gases and particulate matter measured during the 2017 forest fire in Doñana Natural Park, Spain. *Science of the Total Environment*, 645, 710–720. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.181>
- Alencar, A., Zimbres, B., Silva, C., Tsai, D., Silva, F. B. e, Quintana, G. de O., et al. (2022). *Desafios e Oportunidades para Redução das Emissões de Metano no Brasil* (Vol. 369).
- Andreae, M. O., & Merlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 955–966. <https://doi.org/10.1029/2000GB001382>
- Archibald, S. (2016, June 5). Managing the human component of fire regimes: Lessons from Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. Royal Society of London. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0346>
- Areas, J., Üstünda, B., Guo, L., Di, Y., Mendes Guarenghi, M., Walter, A., et al. (2022). Citation: Guarenghi, M Areas Available for the Potential Sustainable Expansion of Soy in Brazil: A Geospatial Assessment Using the SAFmaps Database. <https://doi.org/10.3390/rs14070000>
- Bowman, D. M. J. S., Balch, J. K., Artaxo, P., Bond, W. J., Carlson, J. M., Cochrane, M. A., et al. (2009). Fire in the Earth system. *science*, 324(5926), 481–484.
- Cassino, R. F., Ledru, M. P., Santos, R. de A., & Favier, C. (2020). Vegetation and fire variability in the central Cerrados (Brazil) during the Pleistocene-Holocene transition was influenced by oscillations in the SASM boundary belt. *Quaternary Science Reviews*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106209>
- da Silva Junior, C. A., Teodoro, P. E., Delgado, R. C., Teodoro, L. P. R., Lima, M., de Andréa Pantaleão, A., et al. (2020). Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72571-w>
- Dlugokencky, E. J., Nisbet, E. G., Fisher, R., & Lowry, D. (2011). Global atmospheric methane: budget, changes and dangers. *Philosophical Transactions of the Royal Society A:*

- Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1943), 2058–2072. <https://doi.org/10.1098/RSTA.2010.0341>
- Gomes, C. E., Coughlan Hilter, O., Cardoso, S., Pereira De Oliveira, E., Juarez Batista De Oliveira, F., Gomes, L., et al. (2022). *Equipe técnica da Geasa Equipe técnica da Geote Equipe técnica da Geinf Superintendências regionais Núcleo de Informações Agropecuárias*.
- Habel, J. C., Rasche, L., Schneider, U. A., Engler, J. O., Schmid, E., Rödger, D., et al. (2019, November 1). Final countdown for biodiversity hotspots. *Conservation Letters*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1111/conl.12668>
- Klink, C. A., Sato, M. N., Cordeiro, G. G., & Ramos, M. I. M. (2020, December 1). The role of vegetation on the dynamics of water and fire in the cerrado ecosystems: Implications for management and conservation. *Plants*. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/plants9121803>
- Li, F., Lawrence, D. M., & Bond-Lamberty, B. (2018). Human impacts on 20th century fire dynamics and implications for global carbon and water trajectories. *Global and Planetary Change*, 162, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.002>
- Lima, M. A., Mendes, L. F. R., Mothé, G. A., Linhares, F. G., de Castro, M. P. P., da Silva, M. G., & Sthel, M. S. (2020, March 1). Renewable energy in reducing greenhouse gas emissions: Reaching the goals of the Paris agreement in Brazil. *Environmental Development*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100504>
- Lourençoni, T., da Silva Junior, C. A., Lima, M., Teodoro, P. E., Pelissari, T. D., dos Santos, R. G., et al. (2021). Advance of soy commodity in the southern Amazonia with deforestation via PRODES and ImazonGeo: a moratorium-based approach. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01350-y>
- Magro, C., Nunes, L., Gonçalves, O. C., Neng, N. R., Nogueira, J. M. F., Rego, F. C., & Vieira, P. (2021). Atmospheric trends of CO and CH₄ from extreme wildfires in Portugal using sentinel-5P TROPOMI level-2 data. *Fire*, 4(2). <https://doi.org/10.3390/fire4020025>
- Pausas, J. G., & Lamont, B. B. (2022). Fire-released seed dormancy - a global synthesis. *Biological Reviews*, 97(4), 1612–1639. <https://doi.org/10.1111/brv.12855>
- Piras, S., Wesz, V. J., & Ghinoi, S. (2021). Soy expansion, environment, and human development: An analysis across brazilian municipalities. *Sustainability (Switzerland)*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/su13137246>
- Ribeiro-Kumara, C., Köster, E., Aaltonen, H., & Köster, K. (2020). How do forest fires affect soil greenhouse gas emissions in upland boreal forests? A review. *Environmental Research*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109328>
- Schmidt, I. B., & Eloy, L. (2020). Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151613>
- Silva Junior, C. A. da, Leonel-Junior, A. H. S., Rossi, F. S., Correia Filho, W. L. F., Santiago, D. de B., de Oliveira-Júnior, J. F., et al. (2020). Mapping soybean planting area in midwest Brazil with remotely sensed images and phenology-based algorithm using the Google Earth Engine platform. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105194>
- SOJAMAPS. (2021). Monitoramento de áreas de soja por meio de imagens de satélite. 2021. Accessed 10 January 2021

- Soterroni, A. C., Ramos, F. M., Mosnier, A., Fargione, J., Andrade, P. R., Baumgarten, L., et al. (2019). *Expanding the Soy Moratorium to Brazil's Cerrado*. *Sci. Adv* (Vol. 5). <https://www.science.org>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., et al. (2014). Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 9781107057999, 1–1535. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Strassburg, B. B. N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., et al. (2017, March 23). Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology and Evolution*. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>
- Trigueiro, W. R., Nabout, J. C., & Tassarolo, G. (2020). Uncovering the spatial variability of recent deforestation drivers in the Brazilian Cerrado. *Journal of Environmental Management*, 275, 111243.
- UNFCCC. (2017). National greenhouse gas inventory data for the period 1990–2015. Note by the secretariat. In *UN Climate Change Conference - November 2017*. <http://unfccc.int/10116.php>. Accessed 28 November 2022
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., van Leeuwen, T. T., Chen, Y., Rogers, B. M., et al. (2017, September 12). Global fire emissions estimates during 1997-2016. *Earth System Science Data*. Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017>
- Zu Ermgassen, E. K. H. J., Ayre, B., Godar, J., Bastos Lima, M. G., Bauch, S., Garrett, R., et al. (2020). Using supply chain data to monitor zero deforestation commitments: an assessment of progress in the Brazilian soy sector. *Environmental Research Letters*, 15(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6497>

CAPÍTULO I.

DESMATAMENTO DIRETO PARA PRODUÇÃO DE SOJA NO CERRADO DO MATO GROSSO: EMISSÕES DE CH₄ E IMPACTOS CAUSADOS

O presente manuscrito seguirá as padronizações adotadas pelo periódico *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, no qual presente trabalho será submetido.

CAPÍTULO I. Emissões de metano decorrentes da expansão de áreas de soja no Cerrado brasileiro.

RESUMO: A soja no Brasil ocupa principalmente áreas de Cerrado, como em Mato Grosso (MT), maior estado produtor desta oleaginosa. Uma das consequências da expansão da soja neste bioma são os incêndios, comumente utilizados na abertura de novas áreas de cultivo. Os focos de incêndio contribuem para o aumento das emissões de gases metano (CH₄), um dos mais importante dos gases de efeito estufa (GEE). Os objetivos deste trabalho compreenderam a quantificação dos focos de incêndio nas áreas de vegetação nativa substituídas para implantação da soja do Cerrado do MT. Posteriormente foram analisadas as emissões (CH₄), os valores de *Gross Primary Production* (GPP) e classificação do *Standard Precipitation Index* (SPI), para todo o Cerrado do MT entre os anos de 2020 e 2021. Os resultados mostram a conversão de aproximadamente um milhão de hectares (Mha) de mata nativa no Cerrado do MT, com mapeamento de 12,5 Mha em 2020 e 11,4 Mha em 2021. Nos anos de 2020 e 2021 foram mapeados 6,1 Mha e 6,5 Mha de soja respectivamente. Foram detectados 30.866 focos de incêndios para 2020 e 15.634 focos para 2021. Destes, 59 focos foram em áreas cultivadas com soja que anteriormente foram limpas por queimadas (pontos de interesse), sendo detectados 44 pontos em 2020 e 15 pontos em 2021. Os valores registrados para o CH₄, respectivamente, foram de 12,2 T mol m⁻² para 2020 e 15,5 T mol m⁻² para 2021 na área de estudo. A média por ponto de interesse, onde são contabilizados somente os pontos nas áreas de cultivo de soja, em 2020 foi de 39.222,5 mol m⁻² por ponto e em 2021 foi de 53.369,3 mol m⁻². Os registros de GPP apresentaram valores para a área de estudo de 11,61 gC m⁻² d⁻¹ para 2020 e de 11,07 g C m⁻² d⁻¹ para 2021. Já o SP1-12 classificou a área de estudo de 2020 como extremamente seca. Os valores médios para as áreas de expansão agrícola onde houve desmatamento pelo método de queimadas, demonstrou que em 2021 ocorreu maior concentração de CH₄ por ponto nas áreas de soja.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Agricultura, Tropomi, Gases de Efeito Estufa, Queimadas.

ABSTRACT: Soybeans in Brazil occupy mainly Cerrado areas, such as in Mato Grosso (MT), the largest state producing this oilseed. One of the consequences of soybean expansion in this biome are fires, commonly used to open new areas for cultivation. Fires contribute to the increase of methane gas emissions (CH₄), one of the most important greenhouse gases (GHG). The objectives of this work comprised the quantification of fire outbreaks in areas of native vegetation replaced for soybean plantation in the Cerrado of MT. Subsequently, emissions (CH₄), Gross Primary Production (GPP) values and Standard Precipitation Index (SPI) classification were analyzed for the entire Cerrado of MT between the years 2020 and 2021. The results show the conversion of approximately one million hectares (Mha) of native forest in the Cerrado of MT, with mapping of 12.5 Mha in 2020 and 11.4 Mha in 2021. In the years 2020 and 2021, 6.1 Mha and 6.5 Mha of soybeans were mapped respectively. A total of 30,866 fires were detected for 2020 and 15,634 fires for 2021. Of these, 59 foci were in areas cultivated with soybeans that were previously cleared by burning (points of interest), with 44 points detected in 2020 and 15 points detected in 2021. The values recorded for CH₄, respectively, were 12.2 T mol m⁻² for 2020 and 15.5 T mol m⁻² for 2021 in the study area. The average per

point of interest, where only the points in soybean growing areas are counted, in 2020 was 39,222.5 mol m⁻² per point and in 2021 was 53,369.3 mol m⁻². The GPP records showed values for the study area of 11.61 gC m⁻² d⁻¹ for 2020 and 11.07 g C m⁻² d⁻¹ for 2021. SP1-12, on the other hand, classified the 2020 study area as extremely dry. The average values for the areas of agricultural expansion where there was deforestation by the burning method, showed that in 2021 there was a higher concentration of CH₄ per point in the soybean areas.

Keywords: Remote sensing, agriculture, Tropomi, greenhouse gases, burning.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento da superfície da Terra e da dinâmica de sua vegetação, que utiliza técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) é de importância fundamental para o ambiente. As culturas agrícolas por exemplo, vêm sendo estudadas principalmente no contexto de avaliações da planta por meio de parâmetros biofísicos (Bsaibes et al., 2009; Duveiller et al., 2011) e estimativa de áreas cultivadas (Adami et al., 2012; Pan et al., 2012)

A dinâmica temporal da cultura da soja requer dados que a acompanhe no tempo, seguido do uso de tecnologias e métodos para análise desses dados. Estimadores de áreas cultivadas vêm sendo utilizados por meio de imagens de satélites envolvendo desenho probabilístico, painel de amostragem de áreas e seleção de amostra probabilística (FAO, 1998). Atualmente o que se busca é a produção de uma soja sustentável que não esteja sendo produzida a custos de desmatamento. Assim, uma das formas de se monitorar e também mensurar essa eficiência sustentável é por meio do sensoriamento remoto orbital.

Atualmente, a alteração climática é a principal ameaça à biodiversidade (Parmesan and Yohe, 2003; Silva et al., 2018) devido as elevadas concentrações de gases na atmosfera que contribuem para a ocorrência de alterações climáticas (Wang et al., 2018). O aumento dessas concentrações está intimamente ligado em sua maior parte ao dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), ocasionados principalmente pela mudança no uso da terra e pelo consumo de combustíveis fósseis (Allen et al., 2014), além de diversas ocorrências de focos de incêndios.

No ano de 2019, o Brasil teve 197.632 fogos distribuídos em todo o país. Esses incêndios se espalharam por todos os biomas distintos (ou seja, Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal, Caatinga e Pampa), com diferentes graus de intensidade e uma contribuição

substancial de GEE para a atmosfera (Silva Junior et al., 2020b) e isso tem se alastrado também em áreas com cultivos agrícolas, principalmente no período anterior a semeadura da soja.

A soja é um dos grandes motivadores do desmatamento no Brasil, ocupando principalmente áreas cultivadas anteriormente com pastagens, passando por uma alteração indireta da substituição de floresta-soja. No entanto, hodierno existe uma consciência mundial da sociedade contemporânea na aquisição de produtos que não impactem a natureza, buscando uma produção sustentável. Além disso, fatores naturais e não-naturais, como é o caso das ocorrências de queimadas são preocupações com a biodiversidade e as emissões de gases de efeito estufa. Por vias, as ocorrências dos focos de incêndios em áreas cultivadas com soja e milho estão cada vez mais comuns, no entanto a quantificação e detecção onde esses incêndios ocorrem são desconhecidos, sendo de extrema importância o monitoramento e mensuração desses impactos na emissão de gases. Deste modo a finalidade deste trabalho foi identificar áreas com soja nos anos safras de 2020/2021 e 2021/2022 assim como, quantificar os incêndios e suas emissões de CH₄ em todo o Cerrado do MT. Para isso, foram definidos três objetivos: i) Quantificar e espacializar as áreas de soja no Cerrado do MT utilizando modelo espectral multi-temporal de vegetação, ii) detectar os focos de incêndios ocorridos nos polígonos mapeados com soja nos anos-safras 2020/2021 e 2021/2022 por meio de sensores orbitais e iii) estimar, por meio do sensoriamento remoto, as emissões de CH₄ (mol m⁻²) ocorridas nas áreas cultivadas com soja e que apresentaram focos de incêndios.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização e localização geográfica

A área de estudo compreende o bioma Cerrado do estado de MT (Figura 1). Em termos espaciais, a área do Cerrado Brasileiro totaliza 2.039.242 km², aproximadamente 24% da área territorial do Brasil, abrangendo 1389 municípios. No MT o Cerrado está presente em 92 municípios e tem uma área de aproximadamente 358.736 km², representando 39,75% da área total do estado.

O clima predominante no Domínio do Cerrado é o Tropical sazonal, de inverno seco conforme Köppen-Geiger. A temperatura média anual varia entre 22°C e 23°C. As máximas temperaturas próximas de 40°C e a chuva média anual entre 1.200 e 1.800 mm (Alvares et al., 2013).

O fluxograma das estratégias metodológicas abordadas para analisar as causas da expansão de áreas vegetativas por meio de análises espaciais e temporais no Cerrado do MT é apresentado na Figura 2.

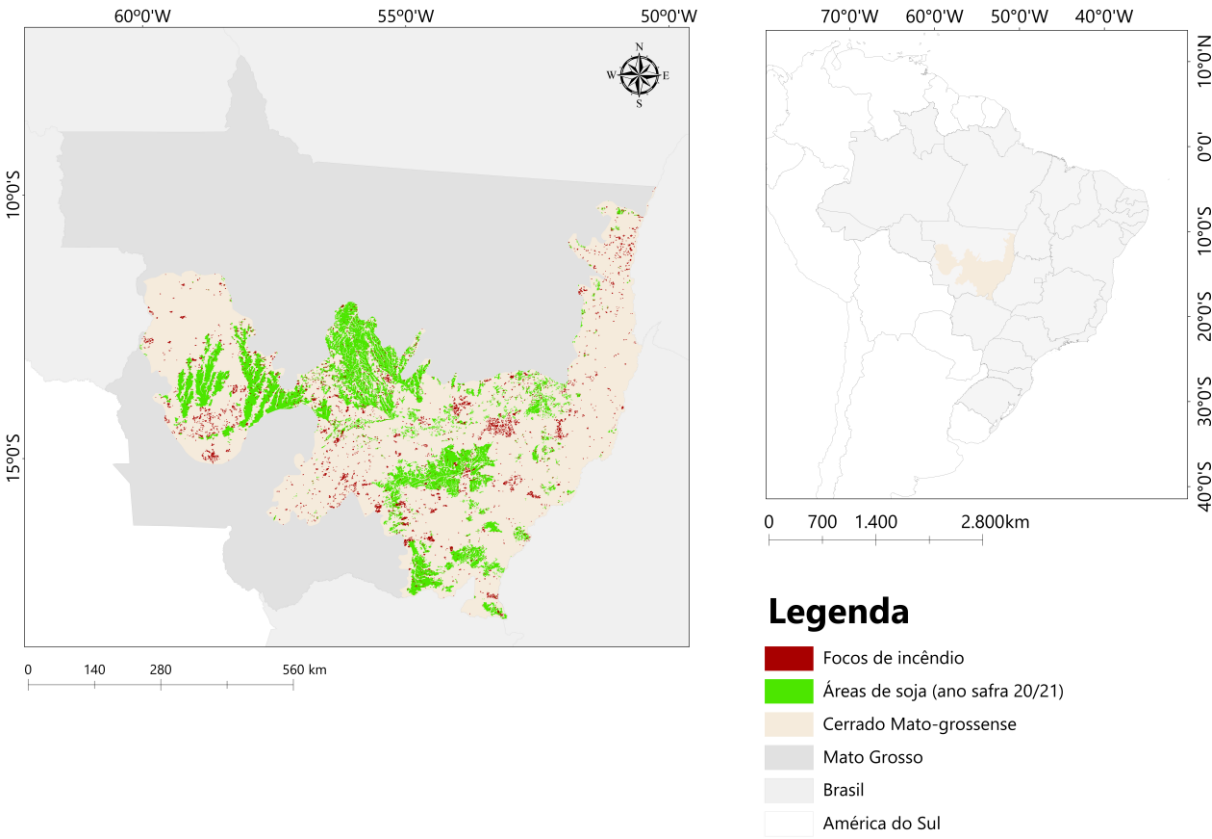


Figura 1. Área de estudo (Cerrado do MT).

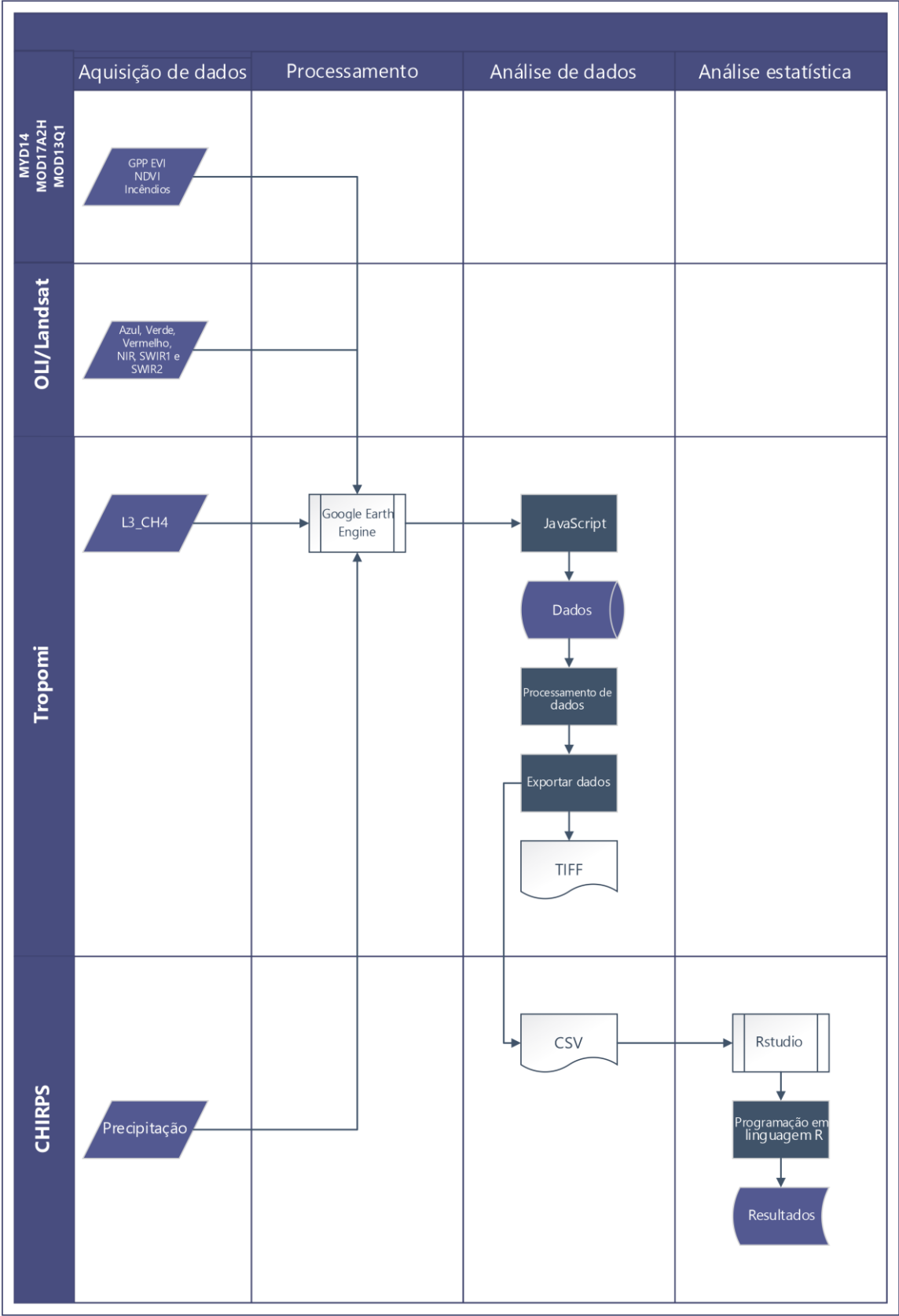


Figura 2 - Fluxograma das etapas de elaboração do projeto de pesquisa até os resultados estatísticos encontrados.

2.2 Focos de incêndio

Os dados dos focos de incêndio foram calculados por meio do sensor MODIS (TERRA/AQUA) quase em tempo real (NRT) MODIS *Thermal Anomalies/Fire Locations* - Coleção 6 processada por NASA's *Land, Atmosphere*. As anomalias térmicas/fogo ativo representam o centro de um pixel de 1 km que é sinalizado pelo algoritmo MODIS MOD14/MYD14 (Ann Heinsch et al., 2003). Esta característica é o produto de fogo mais básico no qual incêndios ativos e outras anomalias térmicas, como vulcões, são identificados. Dados de incêndio quase em tempo real estão disponíveis em aproximadamente três horas do viaduto do satélite e imagens dentro de 4-5 horas. O banco de dados final foi composto por um arquivo entre os anos de 2020 a 2021 de fire_archive_M6 = Anomalias Térmicas/Locais de Incêndio de qualidade padrão MODIS processados pela Universidade de Maryland com um atraso de três meses e distribuídos pela plataforma FIRMS.

Os dados mensais sobre focos de incêndio foram adquiridos entre 2020 e 2021. O período de interesse para os focos de incêndio, foi definido entre o primeiro dia juliano até 304/305 dia juliano de cada ano (1 de janeiro a 31 de outubro), período que antecede o plantio de soja no MT (EMPAER, 2018), limitando apenas áreas que realmente foram desmatadas para o plantio de soja e impedir erros como focos em áreas de soja que foram cultivadas em anos anteriores ao do estudo.

2.3 Áreas nativas

A identificação das áreas de vegetação nativas do Cerrado do MT se demonstrou necessário para a definição dos locais de interesse na área de estudo, sendo realizada uma classificação supervisionada em imagem de satélite para quatro classes, utilizando o algoritmo *ensemble* “*Random Forest*”.

2.3.1 Classificação Supervisionada de Imagem

Random Forest é um método de aprendizado em *ensemble*, não paramétrico proposto por Breiman (2001). O método de algoritmo em *ensemble* consiste em uma técnica de aprendizado supervisionado de máquina, que replica o método matemático CART (*Classification and regression tree*) proposto por Breiman (1984) de apenas uma estrutura lógica de classificação, para uma floresta de árvores de decisões. Cada árvore de decisão realiza uma previsão da classificação desejada baseada nos dados de entrada fornecidos e o algoritmo realiza um agrupamento das previsões para realizar uma previsão final.

As árvores de decisão distribuem o conjunto de dados em conjuntos menores para prever os valores de destino. Para isso, a estrutura da árvore possui ramificações interligadas por “nós” que tem duas bordas de saída (Figura 3). Para cada nó é calculado um valor de importância para reduzir o erro de interferência nos dados por uma probabilidade ponderada. A probabilidade do nó pode ser calculada pelo número de amostras que chegam ao nó, dividido pelo número total de amostras (Equação 1). Os maiores resultados da equação determinam os nós com maior importância.

$$ni_j = w_i C_j - w_{left(j)} C_{left(j)} - w_{right(j)} C_{right(j)} C_{right(j)} \quad (1)$$

Onde, ni_j é a importância do nó j , w_j é o número ponderado de amostras atingindo o nó j , C_j é o valor de erro do nó j , $left(j)$ é o nó filho da divisão esquerda no nó j , $right(j)$ é o nó filho da divisão à direita no nó j .

Então a importância de cada recurso em uma árvore de decisão é calculada por:

$$fi_j = \frac{\sum_{j: \text{nó } j \text{ se separa na característica } i} ni_j}{\sum_{k \in \text{todos nós}} ni_k} \quad (2)$$

Onde, fi_i é a importância do recurso i e ni_j é a importância do nó j .

Logo, os valores são normalizados para um valor entre 0 e 1, dividindo seu valor pela soma de todos os valores de importância:

$$normfi_j = \frac{fi_i}{\sum_{j \in \text{todas características}} fi_j} \quad (3)$$

O modelo Random Forest tem como valor final a média de todas as árvores. A soma do valor de importância de cada característica em cada árvore é calculada e dividida pelo número total de árvores:

$$RFfi_i = \frac{\sum_{j \in \text{todas árvores}} normfi_{ij}}{T} \quad (4)$$

Onde, $RFfi$ é a importância da característica i calculada de todas as árvores no modelo *Random Forest*, $normfi_{ij}$ é a importância do recurso normalizado para i na árvore j e T é o número total de árvores.

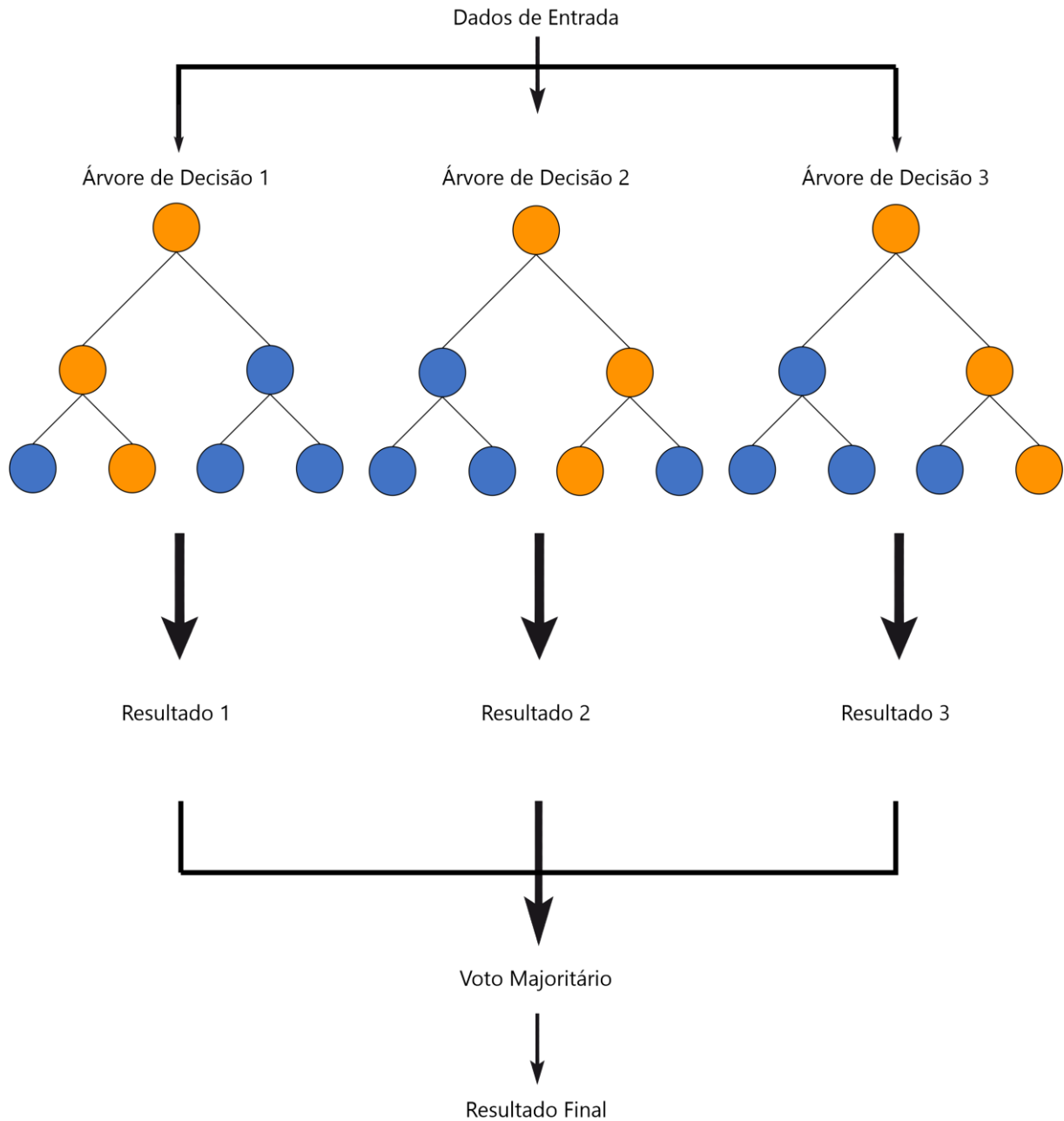


Figura 3 - Árvores de decisão do classificador Random Forest para escolha do voto majoritário entre os dados de entrada para a escolha da classe de saída

O resultado de múltiplos classificadores reduz a variância dos dados, alcançando resultados mais confiáveis do que um único classificador (Sheykhmousa et al., 2020). Deixando o RF mais flexível e rápido ideal para resolver problemas de classificação e regressão

(Joharestani et al., 2019). Assim como o processamento de dados de grande dimensão, abrindo vantagens quando existem muitas amostras e recursos (Zhang et al., 2020).

O classificador Random Forest foi aplicado utilizando a plataforma de processamento digital em JavaScript no Google Earth Engine, que forneceu acesso a imagens obtidas pelo sensor OLI através do satélite Landsat-8. As datas escolhidas para as imagens, define o período anterior ao início do plantio de soja, realizando uma coleção de imagens entre o período de 1 de janeiro de cada ano até 31 de agosto com valores medianos para cada pixel. O algoritmo do Google Earth Engine constrói árvores de decisões aleatoriamente para o processamento e classificação das variáveis desejadas. As árvores de decisão votam pelos melhores resultados e definem por voto majoritário a saída da classificação. Para esse estudo, foram definidas três classes, sendo vegetação nativa, solo exposto e água. O classificador apresenta um melhor desempenho quando atribuído a características distintas, onde ele consegue extrair detalhes significativos de cada classe. Portanto, foi fornecido para o algoritmo do *Random Forest* as bandas espectrais do visível e infravermelho do sensor OLI/Landsat-8 (Tabela 1).

Nome da banda	Descrição	Intervalo espectral (nm)
B1	Aerossol	433 ~ 453
B2	Azul	450 ~ 515
B3	Verde	525 ~ 600
B4	Vermelho	630 ~ 680
B5	Infravermelho próximo	845 ~ 885
B6	Infravermelho de ondas curtas 1	1560 ~ 1660
B7	Infravermelho de ondas curtas 2	2100 ~ 2300
B8	Pancromática	500 ~ 680
B9	Cirrus	1360 ~ 1390

Tabela 1. Bandas espectrais do sensor OLI/Landsat 8.

O resultado da classificação foi vetorizado pelo *Software* Envi versão 5.1, para extrair apenas a classe de vegetação nativa no Cerrado do MT para realizar a intersecção com as outras variáveis de estudo, áreas de soja e os focos de incêndio.

2.4 Áreas de soja

Um dos primeiros aspectos a serem considerados no mapeamento remotamente da soja é o fato de que sua fenologia é um processo progressivo. Portanto, a análise de cultivo da soja envolve o uso de uma série-temporal de imagens de satélite. Para lidar com esta situação, as aquisições das imagens foram selecionadas cobrindo a área de estudo em diversos períodos de um ano agrícola, com o objetivo de destacar dinâmica temporal da cultura da soja, permitindo ao mesmo tempo a melhor distinção de outras classes de cobertura do solo.

Para a detecção das áreas de soja foram utilizadas uma série-temporal do modelo espectral PVI (*Perpendicular Vegetation Index*) (A. J. Richardson e C. L. Wiegand, 1977) com imagens do produto MOD13Q1.006 (MODIS/Terra *Vegetation Indices* 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid) compreendendo todo o estágio fenológico da cultura da soja entre os anos-safras 2020/2021 e 2021/2022 (Silva Junior et al., 2020a). Tais imagens servirão de *input* para o algoritmo PCEI (*Perpendicular Crop Enhancement Index*) desenvolvido por Silva Junior et al. (2017) (Equação 5).

O mapeamento da cultura da soja foi feito conforme a metodologia proposta por Silva Junior et al. (2017). As áreas de cultura de soja foram mapeadas com imagens orbitais do satélite Landsat 8 (*Operational Land Imager - OLI e Thermal Infrared Sensor - TIRS*) e TERRA/AQUA (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS*), por meio do uso de bandas espectrais.

O PCEI foi calculado com base no calendário da cultura de soja do estado do MT. No estágio inicial da cultura de soja as reflectâncias registradas pelo sensor podem interferir nos valores de PCEI, uma vez que o solo estará sem cultivo.

Contudo, para evitar essa interferência foi aplicado o PVI e utilizadas as bandas espectrais de vermelho e infravermelho para regressão em linha da terra, como descrito por Nanni e Demattê (2006).

2.4.1 Cálculo dos Índices de Vegetação

A preferência de intervalos temporais foi com base no calendário agrícola da cultura da soja. Convencionalmente, o ano safra da cultura de soja inicia com os primeiros preparos do solo no mês de agosto com a correção e adubação do solo e se estende até o final de março com a dessecação e colheita dos grãos. Com o resultado destes valores, então foram calculados os índices PCEI e PVI.

Para os valores dos índices PVI e PCEI, ambos utilizam valores de reflectância centrados nos comprimentos de onda do vermelho, infravermelho próximo e podem variar entre -1 e 1, o que possibilita verificar grandes diferenças positivas entre o máximo e o mínimo do observado ao longo do ciclo da soja. Valores elevados de PCEI (Equação 5) indicam probabilidade de a reflectância do pixel ser o da cultura da soja.

$$PCEI = g \cdot \frac{\left(\text{Max} \frac{\rho_{IVP} - a\rho_V - b}{\sqrt{1+a^2}} + S \right) - \left(\text{Min} \frac{\rho_{IVP} - a\rho_V - b}{\sqrt{1+a^2}} + S \right)}{\left(\text{Max} \frac{\rho_{IVP} - a\rho_V - b}{\sqrt{1+a^2}} + S \right) + \left(\text{Min} \frac{\rho_{IVP} - a\rho_V - b}{\sqrt{1+a^2}} + S \right)} \quad (5)$$

Em que: MaxPVI - valor máximo de PVI observado no período de máximo desenvolvimento da cultura da soja; MinPVI - valor mínimo de PVI observado no período de pré-plantio e/ou emergência; S - coeficiente de realce (10^2); g - fator de ganho (10^2).

2.5 Emissões de Metano

Para a detecção e mensuração dos dados de CH_4 , foram utilizados dados do satélite Sentinel-5P. O instrumento a bordo deste satélite é o Tropomi (*TROPOspheric Monitoring Instrument*), um espectrômetro espacial de visualização do nadir que cobre bandas de comprimento de onda entre o ultravioleta e o infravermelho de ondas curtas. Esse instrumento foi lançado em outubro de 2017. Os dados referentes aos níveis de dióxido de nitrogênio, aerossóis, monóxido de carbono, formaldeído, ozônio, dióxido de enxofre (Hu et al., 2018) ficaram disponíveis a partir de abril de 2018, mas para CH_4 os dados só estiveram disponíveis a partir de fevereiro de 2019. Mesmo com alguns valores para 2019, na Zona Tropical diversos pixels se encontram sem valores, possivelmente pelo modelo de correção de dados do algoritmo que estima a quantidade de CH_4 na coluna atmosférica (Buchwitz, 2022).

Para este estudo foram utilizados os dados ativos offline do produto COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_ CH_4 , para realizar um composto de imagens com a soma dos valores de pixels para cada ano de estudo. O ano de 2020 contou com 4853 imagens com valores de CH_4 , já o ano de 2021 apresentou 5016 imagens. Para reduzir o tempo de processamento, as imagens foram recortadas no limite do Cerrado do MT. A composição das imagens foi realizada por uma separação mensal dos valores, extraindo a soma total dos dados de CH_4 detectado no pixel onde foi registrado o ponto de interesse desta pesquisa, os níveis de CH_4 são fornecidos

diretamente em mol m^{-2} (Hasekamp et al., 2021). Por fim, os registros foram atribuídos em uma tabela de extensão “.csv” para a aplicação do modelo estatístico de correlação.

2.6 Gross Primary Production

A produtividade primária bruta (do inglês, *Gross Primary Production*) é a quantidade de compostos carbônicos gerados na fotossíntese e se relaciona à eficiência de uso da energia da luz do Sol para a demanda metabólica e de desenvolvimento de seres fotossintéticos (tendo como principal exemplo as plantas), que por sua vez se relacionam ao sequestro de carbono para fotossíntese. Os valores físicos de GPP são a massa de carbono relacionada a área de superfície em uma taxa temporal, potencialmente estimada a partir de dados de sensores orbitais na forma de um produto orbital (Raymond Hunt Jr et al., 2004)

O GPP foi obtido por meio do produto MOD17A2H Versão 6.1, em uma composição cumulativa de 8 dias de valores com pixels de 500 metros (m) obtidos pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) presente no satélite TERRA (“LP DAAC - MOD17A2H,” n.d.). O cálculo do GPP é baseado no uso eficiente da radiação solar pela vegetação (ε) e relacionado com a radiação absorvida fotossinteticamente ativa (APAR, *Active Photosynthetic Absorbed Radiation*). O APAR é o resultado da fotossíntese em folhas verdes utilizando feixes de luz, também conhecido como energia radiante, correspondente aos comprimentos de onda entre 0,4 a 0,7 μm , processo conhecido como Radiação fotossinteticamente ativa (PAR, *Photosynthetic Active Radiation*) e a fração de radiação fotossinteticamente ativa (FPAR) (Monteith, 1972; Zhao et al., 2005).

$$GPP = \varepsilon \times PAR \times FPAR \quad (6)$$

Onde FPAR é a fração de PAR ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$). O PAR pode ser calculado a partir da radiação solar total de ondas curtas (SWRad; $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) da seguinte forma:

$$PAR = 0.45 \times SWRad \quad (7)$$

A eficiência de uso de luz (LUE), ou ε , muda dependendo de muitos fatores ambientais e da localidade. Isso dificulta o cálculo de ε em áreas e grandes proporções. Para superar esse desafio, os pesquisadores determinaram uma relação entre o máximo valor de LUE (ε_{max}) com

a temperatura mínima do ar ($T_{\min}$) e a quantidade de água presente na estrutura da vegetação (Field et al., 1995)

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \times T_{\min\text{escalar}} \times VPD_{\text{escalar}} \quad (8)$$

Onde $T_{\min\text{escalar}}$ é o escalar de atenuação influenciado pela temperatura mínima diária ($T_{\min}$, °C) e VPD_{escalar} é o déficit de pressão de vapor diurno (VPD_{avg} , Pa) (Zhao et al., 2005; Zhao e Running, 2010).

A obtenção dos valores de GPP foi realizada pela plataforma *Google Earth Engine* no período de 1º de janeiro de 2020 a 31 de dezembro de 2021. Essa faixa temporal foi dividida em duas fases para cada safra, pré-queimada e pós-queimada. Em cada pixel da imagem MODIS foram convertidos os números digitais para valores biofísicos (kg C m^{-2}) por meio de uma multiplicação pelo fator de escala (0.0001) (Heinsch et al., 2003; Zhao et al., 2005). Também foi realizada a transformação dos valores acumulados de oito dias para valores diários para toda a região do cerrado do MT. Cada ponto de interesse de queimada em áreas de colheita de soja foi calculado a absorção de carbono (C) através de cada pixel representativo e seu valor de GPP para cada um dos anos safras e dividido por 1000 para apresentar os valores em gramas de carbono por metro quadrado por dia ($\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

2.7 Índice de Precipitação Padronizada de Chuva

O SPI foi desenvolvido por Mckee et al. (1993) e busca quantificar o déficit ou excesso de chuva em diferentes escalas de tempo e foi calculado na escala anual (SPI-12) para o Cerrado para os anos supracitados a fim de identificar eventos de seca na série-temporal histórica. A realização do cálculo do SPI, dá-se a partir do acumulado total dos registros de chuva superior a 20 anos que é ajustada a uma função de distribuição de probabilidade, a qual é transformada em uma função normal de distribuição de probabilidade, com isso ajusta-se assim o valor médio do SPI de um determinado local e período a zero. A partir dos valores de SPI anual para o Cerrado, foram classificados segundo (Mckee, T.B., Doesken, N.J. e Kleist, 1993) os períodos úmidos e secos, em que: extremamente úmido ($\geq 2,00$), muito úmido (1,5 a 1,99), moderadamente úmido (1,00 a 1,49), próximo ao normal (0,99 a -0,99), moderadamente seco (-1,00 a -1,49), muito seco (-1,50 a -1,99) e extremamente seco ($\leq -2,00$).

Para tanto, foram utilizados conjunto de dados CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) desenvolvido pela U.S. Geological Survey (USGS) e pelo *Climate Hazards Group* da Universidade da Califórnia, Santa Bárbara.

Para determinar o SPI, uma distribuição Gamma definida por uma função de distribuição de probabilidade foi definida como:

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (9)$$

Onde α é o parâmetro da forma, β é o parâmetro de escala, x é a precipitação total e Γ é a função Gamma:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (10)$$

2.8 Análise estatística

A análise estatística e a interpretação dos dados, foram realizadas correlacionando os índices estabelecidos acima. Foi construído um HeatMap para demonstrar a correlação das variáveis avaliadas ao longo da série temporal e sua relação. As análises foram realizadas com a linguagem de programação Python e as bibliotecas Numpy, Pandas e Seaborn.

3. RESULTADOS

3.1 Vegetação nativa

A classificação supervisionada de imagem realizada no *Google Earth Engine* pelo classificador *Random Forest* foi vetorizada para as áreas de vegetação nativa do Cerrado do MT. Em 2021 foram classificados aproximadamente 11,4 Mha, uma diferença de 1 Mha com o ano anterior, o que representa uma queda de 9% da área de vegetação nativa comparada com a classificação de 2020 (12,5 Mha). Foi identificado entre a área de vegetação nativa perdida entre os anos de 2020 a 2021. As áreas de alteração da vegetação foram quantificadas cruzando os vetores de vegetação nativa com os vetores de áreas de soja, pastagens, solo exposto e outros. Sendo essa última, resultados considerados como a substituição por outras culturas agrícolas ou áreas não classificadas.

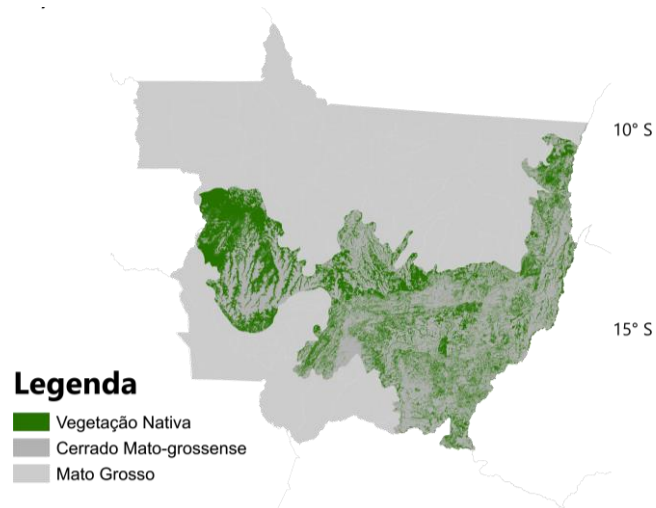


Figura 4. Área de vegetação nativa no Cerrado do estado de MT classificada por Random Forest utilizando imagens do sensor OLI/Landsat-8 referentes ao ano de 2021.

3.2 Focos de incêndio

Os focos de incêndio detectados pelo produto MODIS no Cerrado do MT foi maior no ano de 2020 (30.866 focos) do que no ano de 2021 (15.634 focos) (Figura 5). Desse total de focos de incêndio, 10.187 focos se encontram no período que antecede o plantio de soja no estado para o ano de 2020 e 9.670 no ano de 2021. O Cerrado é o bioma mais afetado por focos de incêndio no Brasil (Silva Junior et al., 2020). Segundo a tabela do Centro de Previsão Climática do *National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA sobre El Niño / *Southern Oscillation* (ENSO), 2021 foi um ano com temperaturas mais amenas do que 2020, possível causa das reduções de focos na região de estudo (Center, 2022). O Nordeste do estado do MT é a maior concentração de focos de incêndio, principalmente nos meses de agosto e setembro, os meses com maiores índices de incêndio (Figura 6).

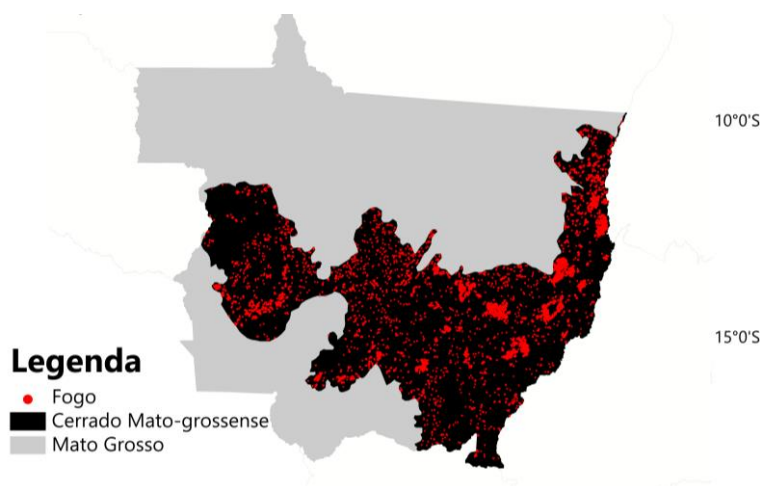


Figura 5. Focos de incêndio na área de estudo em período antecedente ao plantio de soja no estado referente ao ano de 2021.

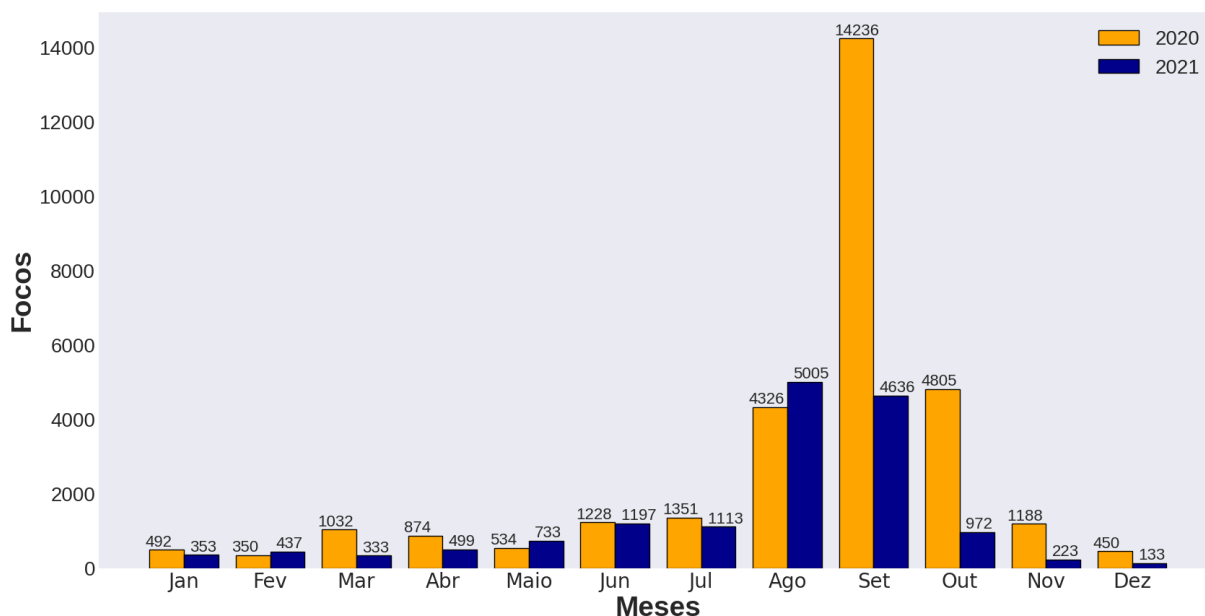


Figura 6. Quantidade de focos de incêndios distribuídos mensalmente no Cerrado do MT detectados pelo sensor MODIS nos anos de 2020 e 2021.

3.3 Áreas de Soja

Os dados de área plantada de soja, incluíram apenas áreas que tiveram o ciclo fenológico da soja completo, ou seja, identifica áreas que teve a colheita realizada, áreas onde a cultivar foi interrompida por algum motivo inesperado não são considerados pelo algoritmo classificador já que não há os valores esperados de máximos e mínimos de índices vegetativos.

Os valores calculados de áreas de soja para as safras 20/21 e 21/22 foram recortados apenas para o Cerrado do estado do MT (Figura 7) onde se registrou uma área plantada de 6,1 Mha e 6,5 Mha respectivamente (Apêndice A e B).

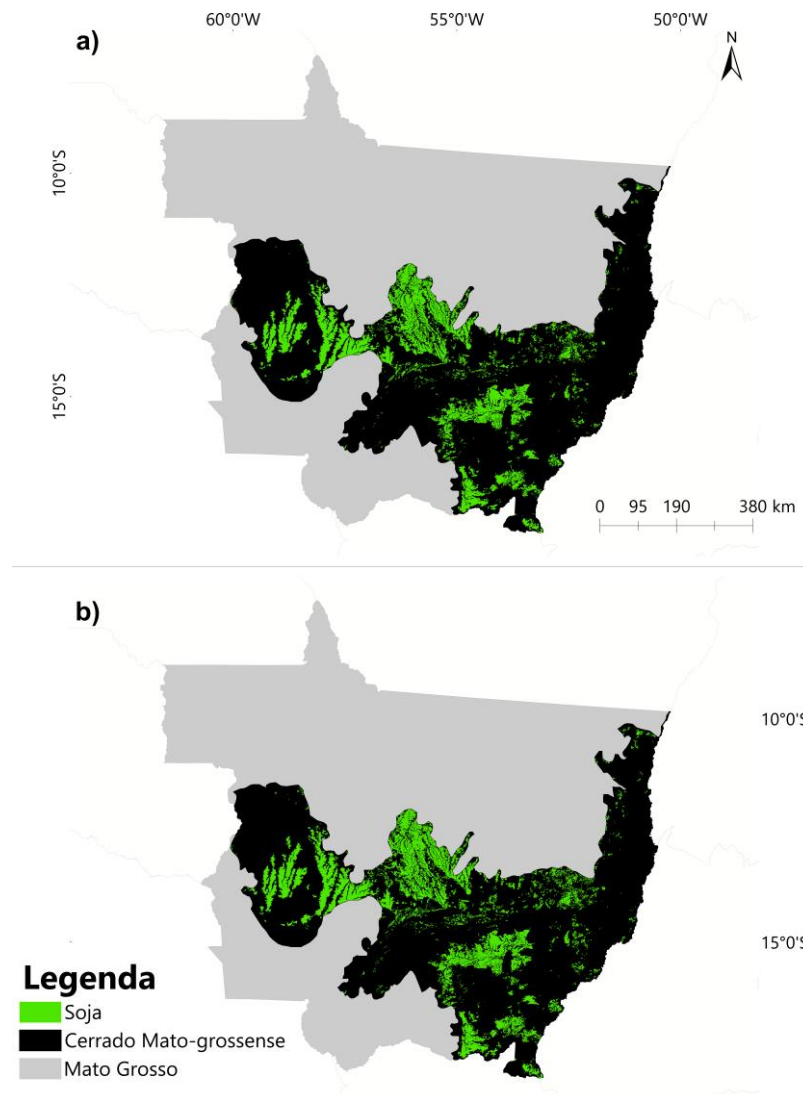


Figura 7. Áreas de soja no Cerrado do MT identificadas pelo PCEI utilizando imagens MODIS e OLI/Landsat-8 nos anos safras 20/21(a) e 21/22 (b).

3.4 Pontos de Interesse

A Figura 8 representa a localização das áreas de desmatamento da vegetação nativa por meio de queimada e em sequência o plantio de soja na região do Cerrado do MT, com um total de 59 pontos para os dois anos de estudo, sendo 44 pontos de interesse no ano de 2020 e 15 pontos definidos no ano de 2021.

A distribuição dos 59 pontos de estudo se deu em 25 pontos no Norte, 21 no Sudeste, 12 no Nordeste e um no Sudoeste do estado, abrangendo municípios como Sorriso, Lucas do Rio Verde e Nova Mutum que são referências no estado por sua alta produção de soja. Nota-se que no primeiro ano as localidades com maiores frequências de pontos de interesse são na região Norte e Sudeste do MT, 17 pontos para ambas as regiões. Já em 2021 o Norte do estado apresentou mais pontos que o Sudeste do estado, oito e quatro respectivamente, mas a região Sudoeste do estado por sua vez não recebeu nenhum ponto de interesse por sua vez.

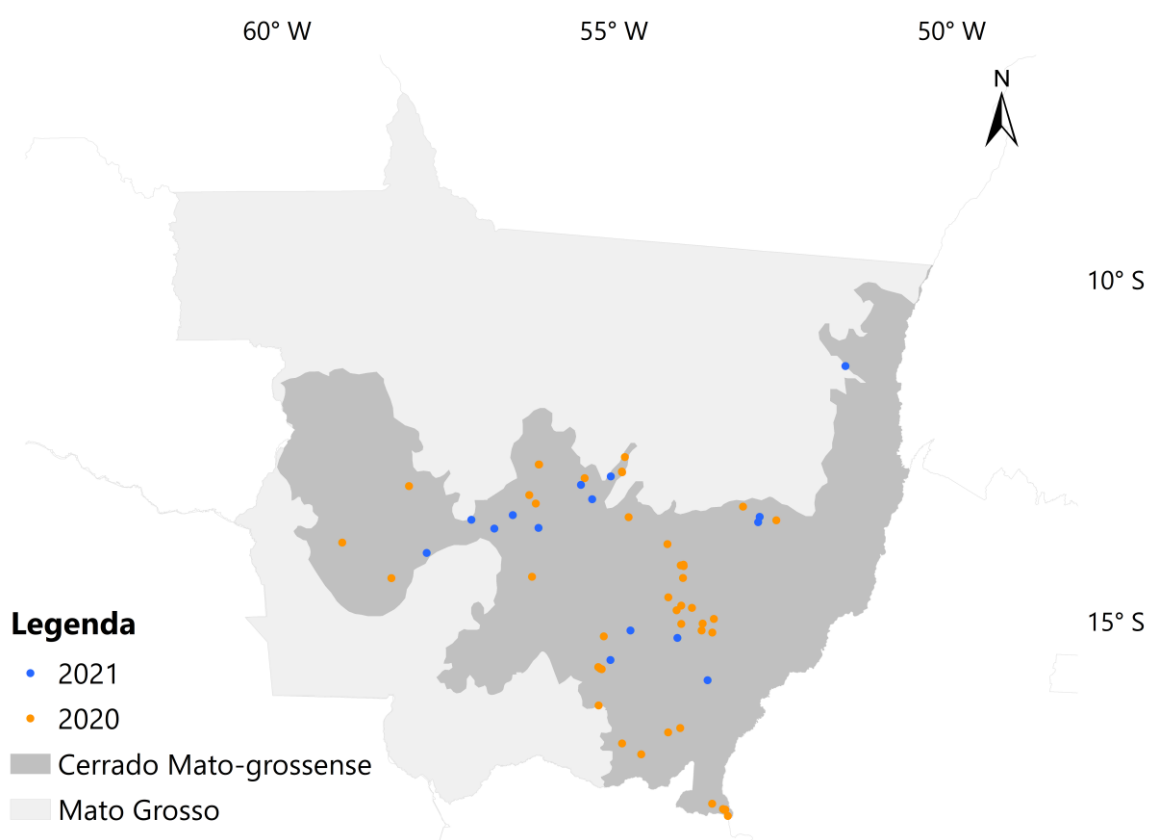


Figura 8. Pontos detectados onde houve foco de incêndio em área de vegetação nativa que foram substituídas por áreas de soja no ano de 2020 e 2021.

3.5 Fração molar da coluna de metano

Os valores registrados pelo sensor TROPOMI no Cerrado do MT no ano de 2020 foram de $12,2 \text{ T mol m}^{-2}$ de CH_4 e para 2021 esse valor foi de $15,5 \text{ T mol m}^{-2}$ de CH_4 , isso representa um aumento de 27% de um ano para o outro, mesmo que, em 2021 contenha menores registros de focos de incêndios. Nas áreas de transição de floresta para as três classes de usos do solo

(solo exposto, soja e pastagem), os valores para áreas de solo exposto apresentou o maior nível de CH_4 118,3 M mol m^{-2} , seguido pelas áreas de soja com 115,4 M mol m^{-2} e a pastagem com 63,3 M mol m^{-2} . Mas ao analisar as médias por classe, as regiões de transição da floresta para soja tiveram a maior média de CH_4 anual (1860,4 mol m^{-2}), em sequência se encontra as pastagens com uma média anual de 1854 mol m^{-2} e solo exposto com 1852 mol m^{-2} (Tabela 2).

Ao colocar em destaque os pontos de interesse, a soma dos valores identificados nas áreas onde a vegetação nativa que foi substituída por área de soja por meio de focos de incêndios no mesmo ano, foi maior no ano de 2020 (1.725.789,708 $\text{mol m}^{-2} \text{CH}_4$) do que no os pontos detectados no ano de 2021 (800.539,062 $\text{mol m}^{-2} \text{CH}_4$). Uma razão para tal motivo, foi a quantidade de pontos de interesse ser maior em 2020 (44 focos) do que em 2021 (15 focos), mas a média por ponto de interesse CH_4 registrada pelo sensor em cada ano é maior em 2021 (53.369,3 mol m^{-2} por ponto) do que em 2020 (39.222,5 mol m^{-2} por ponto), um aumento de 0,42% de CH_4 por vegetação nativa queimada para cultivo de soja no Cerrado do estado do MT. As maiores concentrações de CH_4 se encontram nos municípios de Nova Ubiratã (8,5%), Paranatinga (8,5%), Novo São Joaquim (8,5%), Alto Taquari (8,4%), Jaciara (6,8%), Sorriso (5,1%), Canarana (5,1%), Nova Mutum (5,1%), Lucas do Rio Verde (3,4%), Diamantino (3,4%) e São José do Rio Claro (3,4%). É de grande interesse ressaltar que Sorriso, Nova Mutum, Nova Ubiratã, Diamantino, Paranatinga, Canarana e Lucas do Rio Verde estão entre os 20 maiores produtores do estado do MT, dispendo de 23% de total área plantada de Soja no estado e responsáveis por 47,5% dos gases detectados no Cerrado do MT no período de 2020 a 2022.

A Figura 9 demonstra valores registrados de CH_4 no Cerrado do MT mensalmente no período de estudo deste trabalho. Em períodos chuvosos (novembro a março), quando a atmosfera se encontra carregada de nuvens, é o período com os menores valores de mols/m^2 e no período de seca os maiores valores são detectados pelo TROPOMI (ZHAO et al.,2022). As imagens do TROPOMI são corrigidas para pixels com nuvens. Pixels com valores menores que 70% de confiança são removidos para garantir a qualidade dos dados (Buchwitz, 2022).

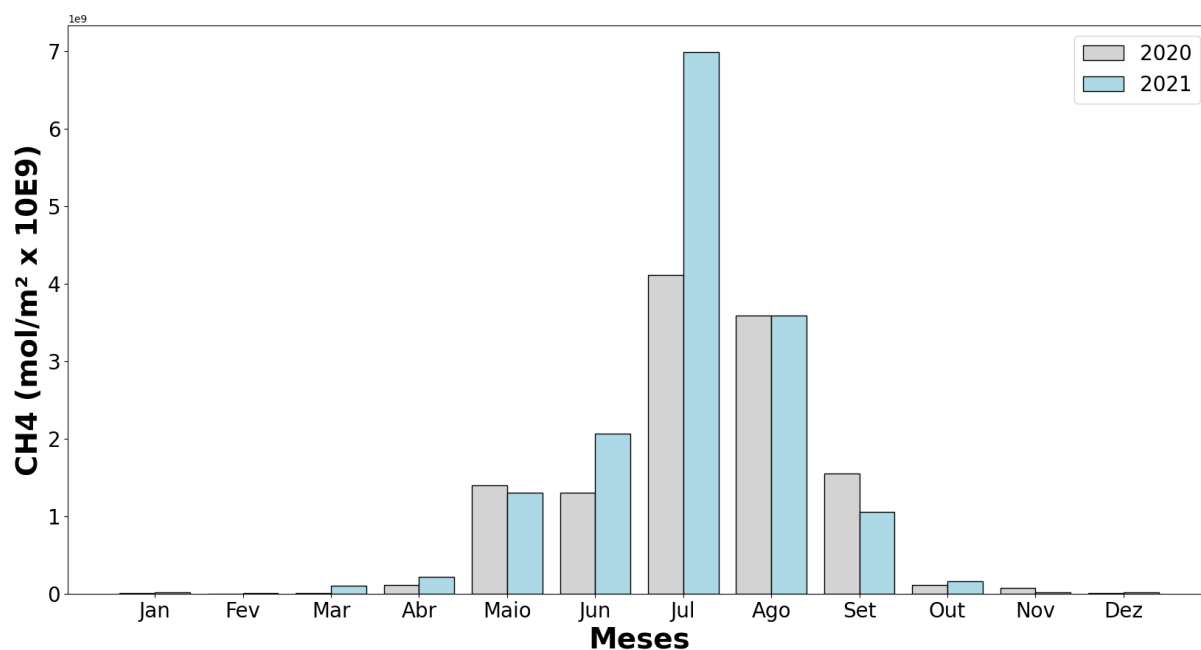


Figura 9. Valores dos níveis de CH₄ no Cerrado do MT obtidos pelo sensor TROPOMI/Sentinel-5P para os anos de 2020 e 2021.

3.6 Gross Primary Production

Os índices fotossintéticos de captura de carbono da vegetação, obtiveram maiores registros de GPP em 2020 (11,61 g C m⁻² d⁻¹). Em contrapartida, o menor valor registrado de absorção de carbono pela vegetação ainda no ano de 2020, foi no mês de setembro (8,71 g C m⁻² d⁻¹), mês com baixos níveis de pluviometria. Já o ano de 2021 obteve níveis próximos aos de 2020 (11,07 g C m⁻² d⁻¹), mas com uma variação menor entre os meses.

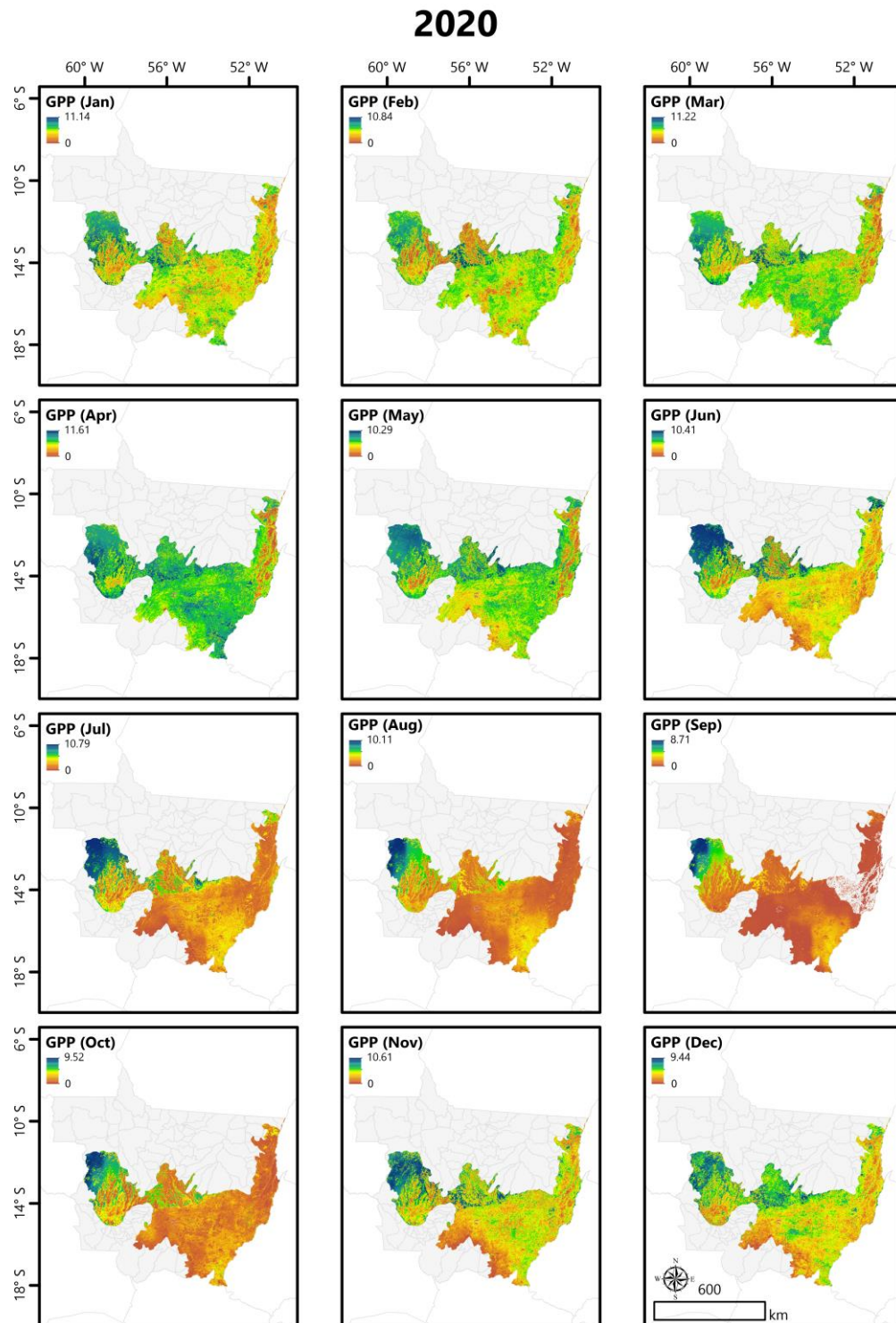


Figura 10. Dados de *Gross Primary Production* (GPP) com valores mensais em g C m⁻² d⁻¹ no ano de 2020 no Cerrado do MT.

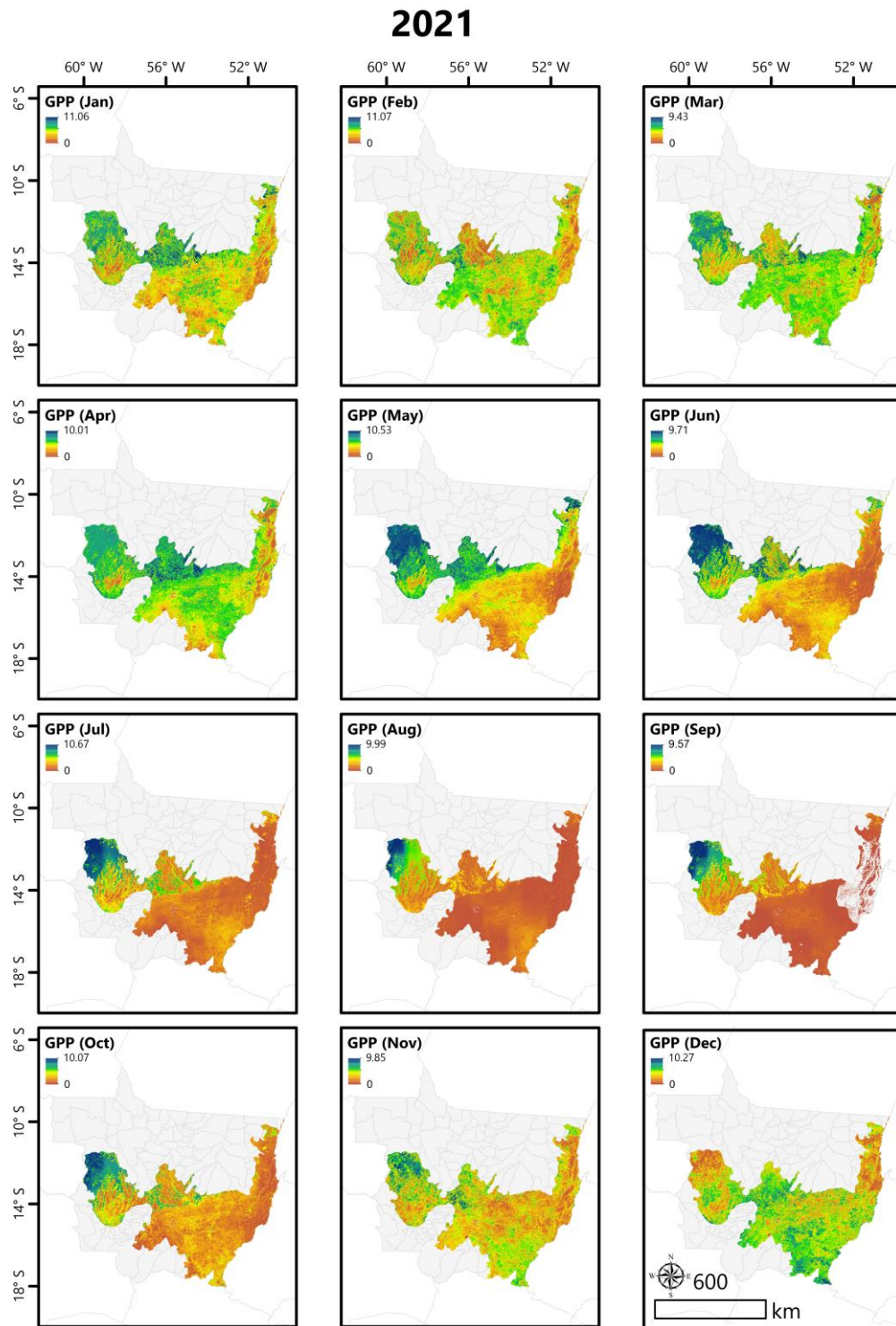


Figura 11. Dados de *Gross Primary Production* (GPP) com valores mensais em $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ no ano de 2021 no Cerrado do MT.

3.7 Índice de Precipitação Padronizada

A parametrização do índice SPI resalta as regiões categorizadas entre Extremamente Seca a Extremamente Úmido (Tabela 2). A maior quantidade de regiões com valores de

extremamente seca é observada no ano de 2020 (Figura 11a) principalmente nas mesorregiões norte, sudeste, sul e sudoeste do MT. Resultado distinto dos valores obtidos para o ano de 2021 (Figura 11b), onde se predomina categorias como Perto do Normal e Moderadamente Úmido por quase todo o território do Cerrado do MT. Além disso, é notável pequenas parcelas de regiões secas (Moderadamente Seco e Muito Seco) no Sul do MT, região de transição com o Pantanal.

O SPI se mostrou conveniente na análise espaço-temporal das mesorregiões na área de estudo. De Oliveira-Júnior et al. (2018), obtiveram bons resultados com a determinação de períodos de seca nas regiões Norte e Noroeste Fluminense em uma série temporal de 46 anos utilizando do SPI.

Tabela 2. Categorias e escala do índice SPI adaptadas de (McKee et al., 1993).

Escala SPI	Categorias
≥ 2	Extremamente Úmido
1,50 a 1,99	Muito Úmido
1,00 a 1,49	Moderadamente Úmido
0,99 a -0,99	Perto do Normal
-1,00 a -1,49	Moderadamente seco
-1,50 a -1,99	Muito Seco
≤ -2	Extremamente Seco

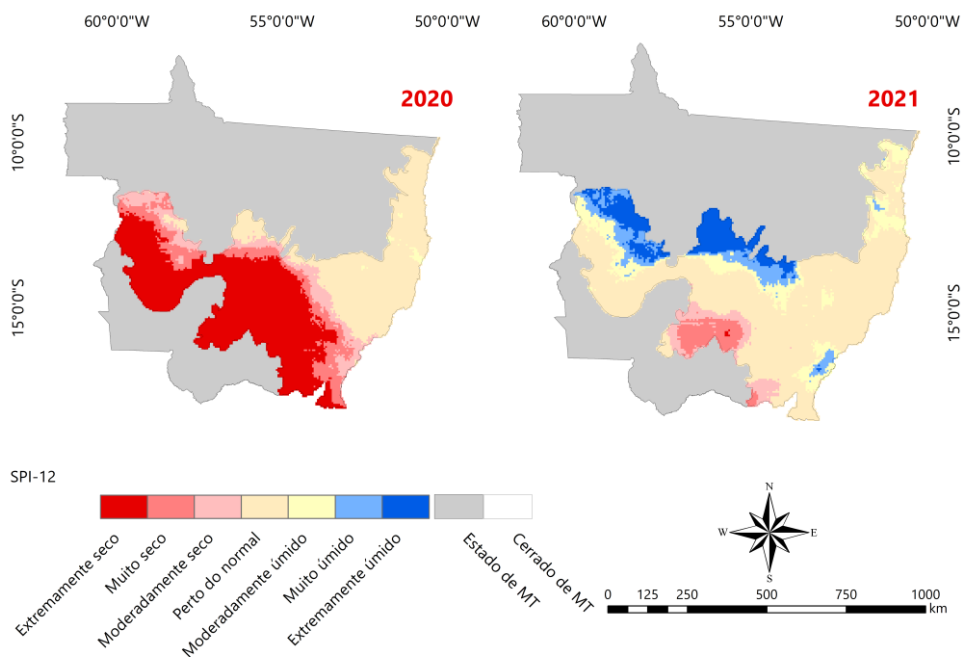


Figura 12. Classificação do SPI proposto por McKee (1993) para o Cerrado do MT nos anos de estudo de 2020 (extremamente seco) e 2021 (perto do normal).

3.8 Análise e interpretação dos dados

A correlação entre CH_4 e SPI, tem uma correlação negativa nos dois anos, significando que quanto menor a precipitação maior são os valores de CH_4 . O mesmo acontece para a correlação entre o GPP e CH_4 , onde os períodos de menores valores de GPP, ou seja, períodos em que a produção de matéria orgânica produzida baseada no uso da eficiência de luz, os valores de CH_4 são maiores. Entretanto, as variáveis GPP e SPI foram correlacionadas positivamente no ano de 2020 (Figura 11), mas para o ano de 2021, se observa uma correlação contrária (Figura 12), uma correlação negativa entre os dois índices.

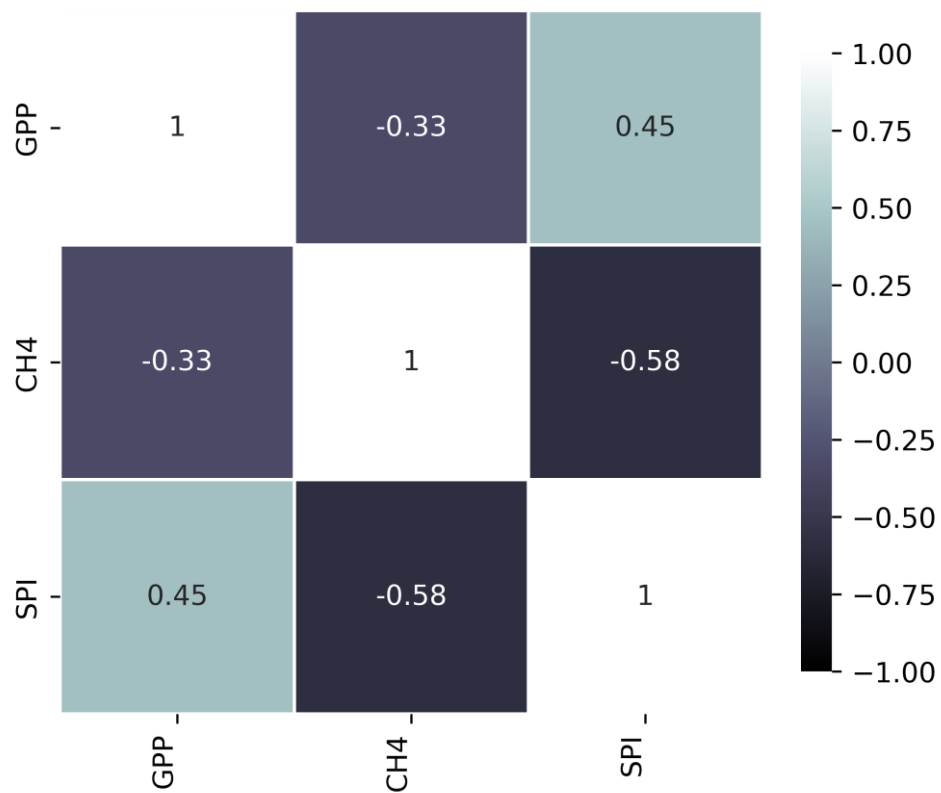


Figura 13. Gráfico de correlação entre as variáveis GPP, SPI e CH₄ analisadas no ano de 2020.

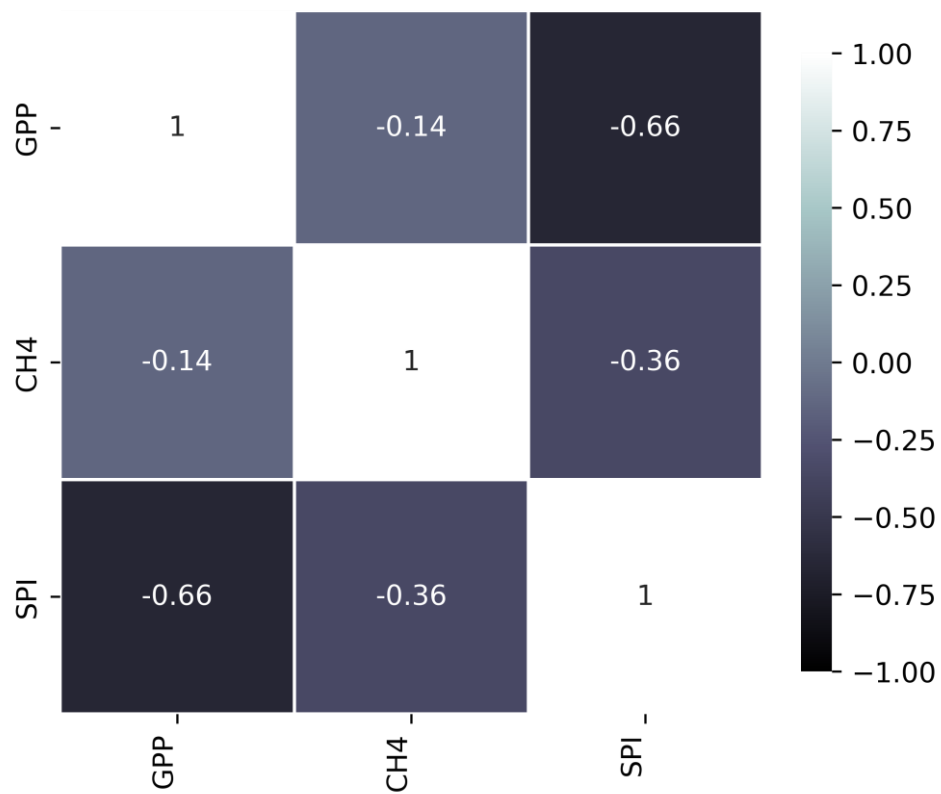


Figura 14. Gráfico de correlação entre as variáveis GPP, SPI e CH₄ analisadas no ano de 2021.

4. DISCUSSÃO

O estado do MT representa uma das maiores fronteiras agrícolas do mundo (Picoli et al., 2018). Ganhando destaque como o principal exportador de *commodities*, como a carne bovina e a soja, no entanto, a degradação ambiental no estado permanece sempre em evidência (Volpato et al., 2022). As áreas cultivadas com soja no Cerrado, aumentaram de 6,1 Mha em 2020 para 6,5 Mha em 2021, avançando sobre as áreas de vegetação nativa (Fig. 4; Fig. 7), isso representa um acréscimo de 400 kha. Esta expansão é reflexo da alta demanda do mercado pela soja (Irfanullah e Iqbal, 2022)

Atualmente, o mercado interno brasileiro necessita de uma demanda de 51.511,3 kt de soja *in natura*, já para o mercado externo são exportados valores superiores, chegando a 77.199,2 toneladas de grãos de soja (Conab et al., 2022). Associada a alta demanda do grão há a supervalorização da saca da soja, que alcançou valores próximos a R\$ 200,00 em 2021 (CEPEA, 2022), resultado do impacto da combinação da alta do dólar nos anos 2021 e 2022 no Brasil, onde a cotação da moeda americana fechou o ano de 2019 no valor de R\$ 4,04 e atingiu valores recordes no ano de 2020 com sua máxima em R\$ 5,85 (Investing, 2022) e das operações de hedge na bolças de valores como a de *Chicago Board of Trade* (CBOT) nos Estados Unidos (Aguiar e Ferreira, 2019). O alto valor comercial da saca de soja, fez-se interessante para a expansão e ocupação da fronteira agrícola. A área central do estado do MT foi explorada pelo uso intensivo do uso do solo para implantar a agricultura, região hoje com os principais municípios produtores de soja no país (Lucas do Rio Verde, Nova Mutum e Sorriso) (Araújo et al., 2018).

O modelo classificador deste estudo, demonstrou que as áreas de soja foi a segunda maior classe de transição de vegetação nativa para usos do solo, e maior média de CH₄ registrado pelo sensor Tropomi nas áreas de transição (1860 mol m⁻²), maior até que, os locais identificados como solo exposto (1852 mol m⁻²) e pastagem (1854 mol m⁻²). Além disso, a expansão da fronteira agrícola no MT vem diminuindo devido as poucas áreas restantes de Savana no estado, o que transfere a atenção para a região do Matopiba, parte do bioma do Cerrado formado pelos territórios dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, por ser a mais nova fronteira agrícola no Cerrado, em razão do baixo valor das terras e o clima favorável

para a agricultura, principalmente da soja (Araújo et al., 2018; Lima et al., 2018; Reis et al., 2020).

Outro fator que facilita e estimula ocupação de novas áreas agrícolas, é a legislação ambiental para o Cerrado, as regulamentações e normas ambiental do Cerrado são bem mais branda quando comparada com o bioma da Amazônia, onde aproximadamente a metade da sua área está sob algum tipo de proteção ambiental e conta com uma exigência de conservação de 80% da sua vegetação nativa, enquanto o Cerrado tem apenas 13% de seu território protegido e a legislação prevê que apenas 20% das áreas de vegetação nativa devem ser preservadas, chegando a 35% se a área de Cerrado estiver dentro da Amazônia Legal (Soterroni et al., 2019).

De acordo com os resultados, aqui apresentados, os focos de incêndio no Cerrado do MT entre os anos de 2020 e 2021 foi aproximadamente de 46.500 focos, onde apenas 59 desses focos representam expansão agrícola para cultivo de soja. O ano de 2020 teve 30.866 focos no Cerrado do MT e 44 pontos de interesse, já o ano de 2021 teve uma redução dos focos de incêndios caindo para 15.634 focos e 15 pontos de interesse. Em 2020, os incêndios na vegetação nativa em todos os biomas brasileiros, chamou bastante atenção do público nacionalmente e internacionalmente, demonstrando o tamanho da dificuldade para a preservação dos ecossistemas naturais do Brasil (Pivello, 2011).

Neste estudo os maiores focos de incêndios foram na estação da seca (maio a setembro) com o pico em agosto, setembro e outubro. (Li et al., 2021) encontram resultados semelhantes para outubro (32,78%) e setembro (46,37%) aos grandes incêndios no Brasil de 2001 a 2015. A maioria dos incêndios são atribuídos a ações antrópicas. Conforme Silva Junior et al. (2020) as queimadas na estação da seca têm maior intensidade e perseveram por maior período. Ao contrário dos incêndios naturais que são menos intensos e predominam na transição da estação seca com a chuva (Schmidt & Eloy, 2020). Oliveira-Júnior et al. (2022) atribui os focos de incêndios no Cerrado a expansão agrícola. Usualmente o fogo é aplicado como ferramenta de manejo nas propriedades, geralmente no período de seca (maio a setembro), onde a vegetação encontrasse em estado de aridez transformado se em um eficiente combustível (Ramos-Neto e Pivello, 2014).

Pivello, (2011) também relata que a maior parte dos incêndios tem como ignição ações humanas, principalmente a agricultura, onde é usado para limpeza, queimar resíduos e rebrota do capim, e quando não é feito aceiros o fogo pode escapa para a vegetação nativa, onde por muitas vezes é de difícil controle. Silva et al. (2019) alertam que mudança na dinâmica natural do fogo no Cerrado, causam alterações intensas no bioma, pois as adaptações das espécies ao

fogo, também inclui uma infinidade de condições ambientais referente ao regime do fogo, assim se aumentar o tempo ou a intensidade da queimada, os benefícios provenientes do fogo são perdidos.

Os valores de SPI-12 segundo a classificação de (Mckee et al., 1993) para o ano de 2020 apresentou maiores áreas de extrema seca do que o ano de 2021 (La Niña), principalmente nas regiões centro-sul, norte, sudeste e sudoeste do MT, já a região nordeste do estado foi classificada como normalidade ou pouco úmido (Figura 10). Há vários estudos que enfatizam a seca de 2019 a 2020 em diferentes biomas brasileiros. Marengo et al. (2021) ressaltaram os impactos da seca no Pantanal, onde os incêndios chamaram a atenção da mídia nacional e internacional. Cuartas et al. (2022) destacaram que a maioria das usinas hidrelétrica brasileiras terminou a estação chuvosa 2020-2021 operando com uma fração da capacidade total de funcionamento. Enquanto Grimm et al. (2020) relatam uma seca extrema no Sul do Brasil, destacando emergência hídrica em alguns locais. Esta estiagem prolongada está condicionada a uma deficiência de precipitação e acréscimo das taxas de evapotranspiração (Junqueira et al., 2020). Levando os registros pluviométricos dessa temporada apresentarem valores distantes de suas condições usuais, caracterizando tal período como um evento extremo (Silva et al., 2022). (Marengo et al., 2022) apontam que as regiões que compreende a Amazonia e o Cerrado estão experimentando eventos extremos combinados de seca e calor nos últimos anos, elevando a temperatura e alongando a estação seca.

Os valores interceptados pelo sensor TROPOMI na área de estudo para o ano de 2020 foi de 12,2 T mol/m² de CH₄, já para o ano de 2021 foi registrado um aumento de 27%, onde apresentou-se um valor de 15,5 T mol/m² de CH₄. No entanto, para o ano de 2021 houve uma redução da quantidade de focos incêndios em relação ao ano de 2020. Também em 2021 foi observado uma perda maior da vegetação nativa, o que representa uma maior quantidade de solo exposto. Ainda, os valores de CH₄ são potencialmente subestimados devido a limitação biofísica climática da presença de nuvens, quando observada numa taxa mensal. Na estação chuvosa (novembro a março) a atmosfera se encontra carregada de nuvens, e é justamente o período com os menores valores de CH₄ aferidos ao longo do ano, e consequentemente, na estação seca foram registrados os maiores valores de CH₄ (Figura 7).

O aumento do CH₄ no Cerrado do MT potencialmente se relaciona ao sistema produtivo agropecuário, que concentra as maiores emissões de CH₄ de atividades antrópicas, com contribuição de 80% das emissões por parte da pecuária (Gerber et al., 2013). Detalhadamente, as emissões relacionadas a produção pecuária se devem a fermentação entérica dos bovinos, a

qual corresponde por 63% das emissões de GEE's e do esterco e urina na pastagem (25%), e 12 % do manejo do esterco (Tubiello et al., 2015). Ainda, pode-se somar a esses fatores as emissões do sistema de suprimentos do gado que compõem este sistema produtivo, como a produção de ração e as mudanças no uso do solo (Wilkes et al., 2017). Segundo o (Indea, 2022), o rebanho bovino Mato Grossense teve um acréscimo de 1,624 milhões de cabeças em 2021, totalizando 32,8 M de cabeças, o que torna o estado do MT o principal produtor pecuário do país.

Outra possibilidade do aumento do CH_4 são as emissões oriundas pela superfície. Lelieveld et al. (1993) constata em sua pesquisa que aproximadamente 45% das emissões globais de CH_4 é baseada nas emissões a partir dos solos, incluindo-se os aterros. Os solos desempenham funções de sumidouro, com a estimativa de aproximadamente 10% do sumidouro total, devido a ação de microrganismos (Topp et al., 2011). Dependendo das condições dos solos os microrganismos podem emitir ou absorver CH_4 , devido à oxidação feita por organismos metanotróficos, esses que possuem grande relevância na absorção do CH_4 da atmosfera, respondendo por 5% do sumidouro microbiano (Conrad, 2009). As comunidades microbianas que contribuem para o ciclo do CH_4 , ainda têm influência do regime de precipitação que interfere na proporção da umidade do solo (Nazaries et al., 2013). Conforme (de Souza e Procópio, 2021), a diversidade e abundância das comunidades bacterianas do Cerrado sofrem alterações de acordo com o uso e ocupação do solo. (Merlo et al., 2022), enfatizam que os solos descobertos, sofrem o efeito da impermeabilização da superfície, reduzindo a umidade, ocasionando danos a microbiota. Isto posto, mitigar os danos na vegetação nativa é processo imprescindível para manter a restituição dos gases entre o solo, vegetação e atmosfera, garantindo um equilíbrio na dinâmica (produção, absorção, transporte e emissão) dos gases da atmosfera (Barba et al., 2019).

Os maiores registros de GPP são em 2020 ($11,61 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Em contrapartida, o menor valor registrado de absorção de carbono pela vegetação ainda no ano de 2020, foi no mês de setembro, GPP 2021 ($11,07 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). A vegetação é essencial como regulador do clima global e regional (Zhu et al., 2017), estimasse que a absorção pelas plantas é de aproximadamente 123 Gt C da atmosfera por meio da fotossíntese, de mesmo modo que, através da respiração autotrófica, é restituído 48% deste valor para o ambiente (Amthor e Baldocchi, 2001; Beer et al., 2010; Ciais et al., 2013). Assim, a vegetação intervém diretamente nos valores de CO_2 atmosférico e diretamente nas mudanças climáticas, retardando o aumento acelerado das temperaturas globais (Lloyd e Farquhar, 2008) (Jacobson et al., 2019). Alterar a vegetação

nativa de um bioma é condizente com a redução ou estímulo dos gases presentes na atmosfera, já que, os fluxos de carbono são maiores em regiões vegetativas do que os propagados pelas ações antrópicas (Le Quéré et al., 2016). Portanto, a vegetação atua com uns dos principais reguladores climáticos em escala local, regional e global, se por razões adversas ocasionar reduções na captação de dióxido de carbono na atmosfera, seja por alteração na eficiência do fluxo de carbono ou por redução na cobertura vegetal, ocorre a possibilidade de agilizar o aquecimento do globo terrestre mais rápido do que o esperado (Dusenge et al., 2019).

A análise estatística de correlação entre as variáveis de estudo, demonstrou um aumento de CH₄ para os períodos mais secos (Feng, 2020), o que corrobora com os dados apresentados na Figura 7, 8, 9 e 10. Entretanto, a alteração de correlação entre as variáveis GPP e SPI entre os anos de estudo, representa que para o ano classificado como Extremamente Seco (Figura 10), os valores mais positivos do SPI resultam em melhores resultados de GPP (maior produção de matéria orgânica), já em um ano que apresentou o índice de seca como normal, a variação de GPP não se correlaciona com o SPI, demonstrando que o GPP é influenciado por outros fatores climáticos.

A compreensão da dinâmica do fogo e as emissões gases relacionadas ao fogo como ferramenta para o promover o uso e a ocupação do solo, demonstra o quanto é crucial ações de controle e prevenção das queimadas no bioma Cerrado (Gomes et al., 2020). O qual se encontra em grande vulnerabilidade (Soterroni et al., 2019). Destacando a necessidade de proteção de suas áreas nativas e levantado o questionamento se é possível a produção de uma soja mais sustentável reduzindo o desgaste ambiental (Magalhães et al., 2020). Uma alternativa para desacelerará o avanço da fronteira agrícola em cima da vegetação remanescente do Cerrado seria a implantação da Moratória da Soja no Cerrado, evitando o comercio de soja oriunda de desmatamentos (Soterroni et al., 2019). A fim de proteger um dos biomas com umas das mais altas biodiversidade e com uma enorme negligência de proteção ambiental (Strassburg et al., 2017)

5. CONCLUSÃO

As maiores ocorrências de focos de incêndios ocorreram no ano de 2020, mesmo ano classificado em extremamente seco pelo SPI. Já as maiores emissões de CH₄ foram em 2021, ano com menor área florestal e uma maior área cultivada por soja, de mesmo modo em que o GPP apresentou os menores valores de crescimento da matéria orgânica na vegetação nativa

em 2021. A correlação definida, demonstrou que o CH₄ é correlacionado positivamente com os índices que definem níveis de seca, ou são interferidos por ela. Os valores obtidos pelo sensor Tropomi, apresentaram dados essenciais para a análise do CH₄ no Cerrado do MT, essa análise vale pela importância das condições climáticas globais.

O aumento nos valores de CH₄ identificados nessa pesquisa, principalmente de áreas com cultura de soja, demonstra que as atuais atitudes antrópicas brasileiras não condizem com propostas estabelecidas nas reuniões das Nações Unidas, para redução de GEE's. O estado de MT apresentou redução nos focos de incêndio e um ano com menores regiões de seca em 2021, mas as áreas de soja têm a maior média de CH₄ por área registrada no sensor Tropomi. O desrespeito ao compromisso estabelecido entre os países, acarreta consequências gravíssimas as vegetações de todo o globo terrestre, como cerrado mantém a elevação nos índices de CH₄, é conveniente supor o aumento das temperaturas regionais e globais, já que o CH₄ é 28 vezes mais prejudicial as elevações de temperatura do que o dióxido de carbono, atualmente o maior gás de efeito estufa e responsável pela maior parte do aquecimento global. A quebra do acordo entre os países, traz uma imagem perniciosa do Brasil, entre as nações, a figura disseminada é de um Estado duvidoso, dificultando a firmação de novos acordos comerciais.

6. RECOMENDAÇÕES FUTURAS

É necessária uma análise temporal maior dos valores futuros de CH₄ por meio do sensor Tropomi (recém-lançado pela ESA - *European Space Agency*), mesmo com poucos anos de dados, os resultados apresentaram ser bem precisos. Estimar gás de CH₄ na atmosfera não é uma tarefa simples de se realiza, mesmo assim, os dados se aproximam dos reais devido aos métodos de correção de dados no algoritmo. Por isso, é deixado como recomendação, uma análise espaço-temporal de uma década ou mais, para o bioma de Cerrado do MT e suas emissões de CH₄ pelo sensor em questão.

REFERÊNCIAS

- A. J. Richardson, C. L. Wiegand, 1977. Distinguishing Vegetation from Soil Background Information. *Photogramm Eng Remote Sensing* 43, 1541–1552.
- Adami, M., Rudorff, B.F.T., Freitas, R.M., Aguiar, D.A., Sugawara, L.M., Mello, M.P., 2012. Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil. *Sustainability* 2012, Vol. 4, Pages 574-585 4, 574–585. <https://doi.org/10.3390/SU4040574>
- Aguiar, O.F.T., Ferreira, J.D., 2019. ANALYSIS OF SOYBEAN TRADE STRATEGIES WITH FORWARD CONTRACTS ON THE CHICAGO STOCK EXCHANGE AND ON THE SPOT MARKET IN CASCAVEL, BRAZIL. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* 12, 1487–1505. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019V12N4P1487-1505>
- Allen, S.K., Plattner, G.-K., Nauels, A., Xia, Y., Stocker, T.F., 2014. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. An overview of the Working Group 16, 2014–3544.
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Ann Heinsch, Matt Reeves, Petr Votava, Sinkyu Kang, Cristina Milesi, Maosheng Zhao, Joseph Glassy, William Jolly, Rachel Loehman, Chad F Bowker, John S Kimball, Ramakrishna R Nemani, Steven W Running, Faith M, Andrew Neuschwander, 2003. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm Gross Primary Production (GPP) 1-km MODIS image Global GPP image created.
- Araújo, M.L.S. de, Sano, E.E., Bolfe, É.L., Santos, J.R.N., Santos, J.S. dos, Silva, F.B., 2018. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990-2015). <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.040>
- Barba, J., Bradford, M.A., Brewer, P.E., Bruhn, D., Covey, K., van Haren, J., Megonigal, J.P., Mikkelsen, T.N., Pangala, S.R., Pihlatie, M., Poulter, B., Rivas-Ubach, A., Schadt, C.W., Terazawa, K., Warner, D.L., Zhang, Z., Vargas, R., 2019. Methane emissions from tree stems: a new frontier in the global carbon cycle. *New Phytologist* 222, 18–28. <https://doi.org/10.1111/NPH.15582>
- Breiman, L., 2001. *Random Forests* 45, 5–32.
- Bsaibes, A., Courault, D., Baret, F., Weiss, M., Olivos, A., Jacob, F., Hagolle, O., Marloie, O., Bertrand, N., Desfond, V., Kzemipour, F., 2009. Albedo and LAI estimates from

- FORMOSAT-2 data for crop monitoring. *Remote Sens Environ* 113, 716–729. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.014>
- Center, N.C.P., 2022. NOAA's Climate Prediction Center [WWW Document]. URL https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php (accessed 10.28.22).
- CEPEA, 2022. Soja - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP [WWW Document]. URL <https://www.cepea.esalq.usp.br/br> (accessed 11.28.22).
- Conab, Gomes, C.E., Coughlan Hilter, O., Cardoso, S., Pereira De Oliveira, E., Juarez Batista De Oliveira, F., Gomes, L., Marco, S., Garcia, A., Chaves, M., Gama De Macêdo, M.H., Gontijo, E.C., Arthur, F., Lima, S., Santos, R. dos, Tarsis, S., de Oliveira Piffer, R., Barros De Sousa, F., Mara, R., Neves, R., Kaefer, A.L., Valnier, A., Santos De Azevedo, A., Pan, A.A., 2022. Equipe técnica da Geasa Equipe técnica da Geote Equipe técnica da Geinf Superintendências regionais Núcleo de Informações Agropecuárias.
- Conrad, R., 2009. The global methane cycle: recent advances in understanding the microbial processes involved. *Environ Microbiol Rep* 1, 285–292. <https://doi.org/10.1111/J.1758-2229.2009.00038.X>
- Cuartas, L.A., Cunha, A.P.M.D.A., Alves, J.A., Parra, L.M.P., Deusdará-Leal, K., Costa, L.C.O., Molina, R.D., Amore, D., Broedel, E., Seluchi, M.E., Cunningham, C., Alvalá, R.C.D.S., Marengo, J.A., 2022. Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. *Water (Switzerland)* 14, 601. <https://doi.org/10.3390/W14040601/S1>
- Oliveira-Júnior, J.F. de, Gois, G. de, Bodas Terassi, P.M. de, Silva Junior, C.A. da, Blanco, C.J.C., Sobral, B.S., Gasparini, K.A.C., 2018. Drought severity based on the SPI index and its relation to the ENSO and PDO climatic variability modes in the regions North and Northwest of the State of Rio de Janeiro - Brazil. *Atmos Res* 212, 91–105. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2018.04.022>
- Oliveira Júnior, J.F. de, Shah, M., Abbas, A., Correia Filho, W.L.F., Silva Junior, C.A. da, Santiago, D. de B., Teodoro, P.E., Mendes, D., Souza, A. de, Aviv-Sharon, E., Silveira, V.R., Pimentel, L.C.G., da Silva, E.B., Haq, M.A., Khan, I., Mohamed, A., Attia, E.A., 2022. Spatiotemporal Analysis of Fire Foci and Environmental Degradation in the Biomes of Northeastern Brazil. *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 6935 14, 6935. <https://doi.org/10.3390/SU14116935>

- Dusenge, M.E., Duarte, A.G., Way, D.A., 2019. Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist* 221, 32–49. <https://doi.org/10.1111/NPH.15283>
- Duveiller, G., Baret, F., Defourny, P., 2011. Crop specific green area index retrieval from MODIS data at regional scale by controlling pixel-target adequacy. *Remote Sens Environ* 115, 2686–2701. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.026>
- EMPAER, 2018. Calendário Agrícola [WWW Document]. URL <http://www.empaer.mt.gov.br/-/8066843-calendario-agricola?ciclo=> (accessed 9.25.22).
- FAO, 1998. Multiple frame agricultural surveys: agricultural survey programmes based on area frame or dual frame (area and list) sample designs. 178.
- Field, C.B., Randerson, J.T., Malmström, C.M., 1995. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sens Environ* 51, 74–88. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00066-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00066-V)
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., Tempio, G., 2013. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*.
- Gomes, L., Miranda, H.S., Silvério, D. v., Bustamante, M.M.C., 2020. Effects and behaviour of experimental fires in grasslands, savannas, and forests of the Brazilian Cerrado. *For Ecol Manage* 458, 117804. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2019.117804>
- Grimm, A.M., Almeida, A.S., Beneti, C.A.A., Leite, E.A., 2020. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. *RBRH* 25. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200116>
- Hasekamp, O., Lorente, A., Hu, H., Butz, A., Aan De Brugh, J., Landgraf, J., 2021. Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor Methane Retrieval.
- Heinsch, F.A., Heinsch, F.A., Milesi, C., Jolly, W.M., Bowker, C.F., Kimball, J.S., Nemani, R.R., 2003. User 's Guide NASA MODIS Land Algorithm Joseph Glassy 4.
- Hu, H., Landgraf, J., Detmers, R., Borsdorff, T., Aan de Brugh, J., Aben, I., Butz, A., Hasekamp, O., 2018. Toward Global Mapping of Methane With TROPOMI: First Results and Intersatellite Comparison to GOSAT. *Geophys Res Lett* 45, 3682–3689. <https://doi.org/10.1002/2018GL077259>
- Indea, 2022. Pecuária de MT quebra novo recorde e rebanho atinge 32,7 milhões de cabeças - Notícias - INDEA [WWW Document]. URL <http://www.indea.mt.gov.br/-/18851655->

- pecuaria-de-mt-quebra-novo-recorde-e-rebanho-atinge-32-7-milhoes-de-cabecas (accessed 12.1.22).
- Investing, 2022. Preços Históricos USD/BRL [WWW Document]. URL <https://br.investing.com/currencies/usd-brl-historical-data> (accessed 11.28.22).
- Irfanullah, Iqbal, J., 2022. Commodity Market Dynamics: Who's Behind Booms and Busts? *Borsa Istanbul Review*. <https://doi.org/10.1016/j.bir.2022.09.005>
- Jacobson, T.A., Kler, J.S., Hernke, M.T., Braun, R.K., Meyer, K.C., Funk, W.E., 2019. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability* 2019 2:8 2, 691–701. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>
- Joharestani, M.Z., Cao, C., Ni, X., Bashir, B., Talebiesfandarani, S., 2019. PM2.5 Prediction Based on Random Forest, XGBoost, and Deep Learning Using Multisource Remote Sensing Data. *Atmosphere* 2019, Vol. 10, Page 373 10, 373. <https://doi.org/10.3390/ATMOS10070373>
- Junqueira, R., Viola, M.R., Amorim, J. da S., de Mello, C.R., 2020. Hydrological Response to Drought Occurrences in a Brazilian Savanna Basin. *Resources* 2020, Vol. 9, Page 123 9, 123. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES9100123>
- Lelieveld, J., Crutzen, P.J., Brühl, C., 1993. Climate effects of atmospheric methane. *Chemosphere* 26, 739–768. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(93\)90458-H](https://doi.org/10.1016/0045-6535(93)90458-H)
- Li, S., Gao, M., Li, Z.-L., Duan, S., Leng, P., 2021. Uncertainty analysis of SVD-based spaceborne far-red sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval using TanSat satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 103, 102517. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102517>
- Lima, M., Antonio Da Silva Junior, C., Rausch, L., Gibbs, H.K., Johann, J.A., 2018. Demystifying sustainable soy in Brazil ☆. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.016>
- Lloyd, J., Farquhar, G.D., 2008. Effects of rising temperatures and [CO₂] on the physiology of tropical forest trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 1811–1817. <https://doi.org/10.1098/RSTB.2007.0032>
- LP DAAC - MOD17A2H [WWW Document], n.d. URL <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a2hv061/> (accessed 9.26.22).
- Magalhães, I.B., Pereira, A.S.A. de P., Calijuri, M.L., Alves, S. do C., Santos, V.J. dos, Lorentz, J.F., 2020. Brazilian Cerrado and Soy moratorium: Effects on biome preservation and

- consequences on grain production. Land use policy 99, 105030. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2020.105030>
- Marengo, J.A., Cunha, A.P., Cuartas, L.A., Deusdará Leal, K.R., Broedel, E., Seluchi, M.E., Michelin, C.M., de Praga Baião, C.F., Chuchón Ângulo, E., Almeida, E.K., Kazmierczak, M.L., Mateus, N.P.A., Silva, R.C., Bender, F., 2021. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water* 3, 13. <https://doi.org/10.3389/FRWA.2021.639204/BIBTEX>
- Marengo, J.A., Jimenez, J.C., Espinoza, J.-C., Cunha, A.P., Luiz, &, Aragão, E.O., 2022. Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia-Cerrado transition zone. *Scientific Reports* | 12, 457. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4>
- Mckee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Eighth Conference on Applied Climatology* 179–184.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. THE RELATIONSHIP OF DROUGHT FREQUENCY AND DURATION TO TIME SCALES. *Eighth Conference on Applied Climatology* 17–22.
- Merlo, M.N., Avanzi, J.C., da Silva, L. de C.M., Aragão, O.O. da S., Borghi, E., Moreira, F.M. de S., Thebaldi, M.S., de Resende, Á.V., Silva, M.L.N., Silva, B.M., 2022. Microbiological Properties in Cropping Systems and Their Relationship with Water Erosion in the Brazilian Cerrado. *Water* 2022, Vol. 14, Page 614 14, 614. <https://doi.org/10.3390/W14040614>
- Monteith, J.L., 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems, Source: *Journal of Applied Ecology*.
- Nanni, M.R., Demattê, J.A.M., 2006. Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. *Soil Science Society of America Journal* 70, 393–407. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2003.0285>
- Nazaries, L., Murrell, J.C., Millard, P., Baggs, L., Singh, B.K., 2013. Methane, microbes and models: Fundamental understanding of the soil methane cycle for future predictions. *Environ Microbiol* 15, 2395–2417. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12149/SUPPINFO>
- Pan, Y., Li, L., Zhang, J., Liang, S., Zhu, X., Sulla-Menashe, D., 2012. Winter wheat area estimation from MODIS-EVI time series data using the Crop Proportion Phenology Index. *Remote Sens Environ* 119, 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.011>
- Parmesan, C., Yohe, G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 2003 421:6918 421, 37–42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>

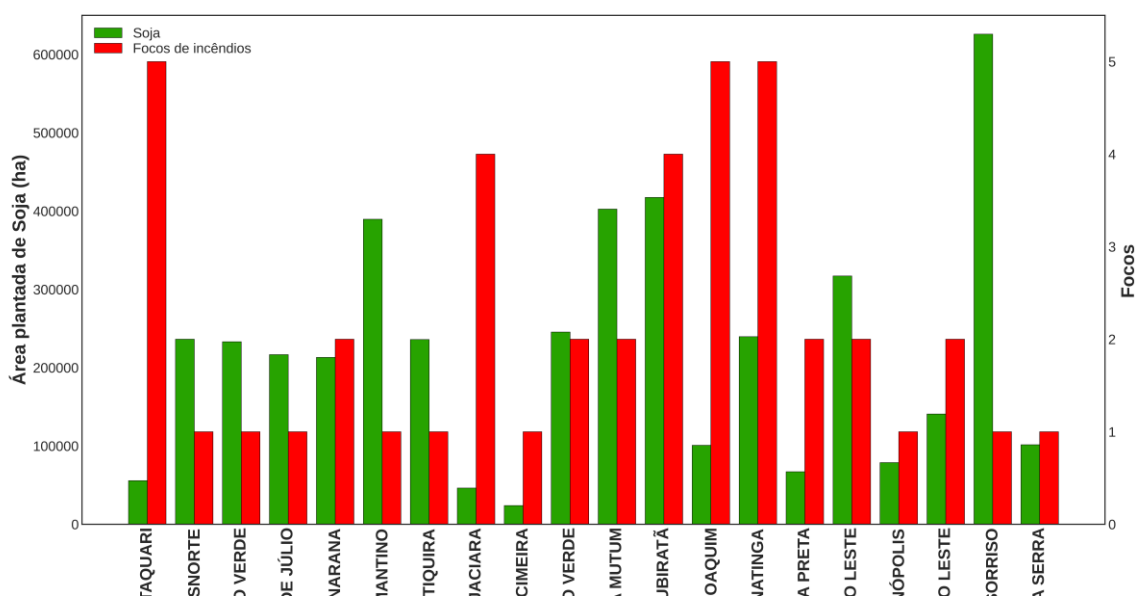
- Picoli, M.C.A., Camara, G., Sanches, I., Simões, R., Carvalho, A., Maciel, A., Coutinho, A., Esquerdo, J., Antunes, J., Begotti, R.A., Arvor, D., Almeida, C., 2018. Big earth observation time series analysis for monitoring Brazilian agriculture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 145, 328–339. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.08.007>
- Pivello, V.R., 2011. The use of fire in the cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: Past and present. *Fire Ecology* 7, 24–39. <https://doi.org/10.4996/FIREECOLOGY.0701024/FIGURES/7>
- Ramos-Neto, M.B., Pivello, V.R., 2014. Lightning Fires in a Brazilian Savanna National Park: Rethinking Management Strategies. *Environmental Management* 2000 26:6 26, 675–684. <https://doi.org/10.1007/S002670010124>
- Raymond Hunt Jr, E., Kelly, R.D., Smith, W.K., Fahnestock, J.T., Welker, J.M., Raymond Jr, E., 2004. Estimation of Carbon Sequestration by Combining Remote Estimation of Carbon Sequestration by Combining Remote Sensing and Net Ecosystem Exchange Data for Northern Mixed-Sensing and Net Ecosystem Exchange Data for Northern Mixed-Grass Prairie and Sagebrush-Steppe Ecosystems . <https://doi.org/10.1007/s00267-003-9151-0>
- Reis, L., Silva, C.M.S.E., Bezerra, B., Mutti, P., Spyrides, M.H., Silva, P., Magalhães, T., Ferreira, R., Rodrigues, D., Andrade, L., 2020. Influence of Climate Variability on Soybean Yield in MATOPIBA, Brazil. *Atmosphere* 2020, Vol. 11, Page 1130 11, 1130. <https://doi.org/10.3390/ATMOS11101130>
- Schmidt, I.B., Eloy, L., 2020. Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 268. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151613>
- Sheykhmousa, M., Mahdianpari, M., Ghanbari, H., Mohammadimanesh, F., Ghamisi, P., Homayouni, S., 2020. Support Vector Machine Versus Random Forest for Remote Sensing Image Classification: A Meta-Analysis and Systematic Review. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens* 13, 6308–6325. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3026724>
- Silva Junior, C.A. da, Leonel-Junior, A.H.S., Rossi, F.S., Correia Filho, W.L.F., Santiago, D. de B., de Oliveira-Júnior, J.F., Teodoro, P.E., Lima, M., Capristo-Silva, G.F., 2020a. Mapping soybean planting area in midwest Brazil with remotely sensed images and phenology-based algorithm using the Google Earth Engine platform. *Comput Electron Agric* 169. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105194>

- Silva Junior, C.A. da, Nanni, M.R., Teodoro, P.E., Silva, G.F.C., 2017. Vegetation Indices for Discrimination of Soybean Areas: A New Approach. *Agron J* 109, 1331–1343. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2017.01.0003>
- Silva Junior, C.A. da, Teodoro, P.E., Delgado, R.C., Teodoro, L.P.R., Lima, M., de Andréa Pantaleão, A., Baio, F.H.R., de Azevedo, G.B., de Oliveira Sousa Azevedo, G.T., Capristo-Silva, G.F., Arvor, D., Facco, C.U., 2020. Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. *Scientific Reports* 2020 10:1 10, 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72571-w>
- Silva Junior, C.A. da, Teodoro, P.E., Delgado, R.C., Teodoro, L.P.R., Lima, M., de Andréa Pantaleão, A., Baio, F.H.R., de Azevedo, G.B., de Oliveira Sousa Azevedo, G.T., Capristo-Silva, G.F., Arvor, D., Facco, C.U., 2020b. Persistent fire foci in all biomes undermine the Paris Agreement in Brazil. *Scientific Reports* 2020 10:1 10, 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72571-w>
- Silva, M.A., Lima, M., Silva Junior, C.A., Costa, G.M., Peres, C.A., 2018. Achieving low-carbon cattle ranching in the Amazon: ‘Pasture sudden death’ as a window of opportunity. *Land Degrad Dev* 29, 3535–3543. <https://doi.org/10.1002/ldr.3087>
- Silva, T.R.B.F., Santos, C.A.C. dos, Silva, D.J.F., Santos, C.A.G., da Silva, R.M., de Brito, J.I.B., 2022. Climate Indices-Based Analysis of Rainfall Spatiotemporal Variability in Pernambuco State, Brazil. *Water* 2022, Vol. 14, Page 2190 14, 2190. <https://doi.org/10.3390/W14142190>
- Soterroni, A.C., Ramos, F.M., Mosnier, A., Fargione, J., Andrade, P.R., Baumgarten, L., Pirker, J., Obersteiner, M., Kraxner, F., Câmara, G., Carvalho, A.X.Y., Polasky, S., 2019. Expanding the soy moratorium to Brazil’s Cerrado. *Sci Adv* 5, 7336–7353. https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAV7336/SUPPL_FILE/AAV7336_SM.PDF
- Souza, L.C. de, Procópio, L., 2021. The profile of the soil microbiota in the Cerrado is influenced by land use. *Applied Microbiology and Biotechnology* 2021 105:11 105, 4791–4803. <https://doi.org/10.1007/S00253-021-11377-W>
- Strassburg, B.B.N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., Latawiec, A.E., Oliveira Filho, F.J.B., de Scaramuzza, C.A.M., Scarano, F.R., Soares-Filho, B., Balmford, A., 2017. Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nat Ecol Evol*. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>

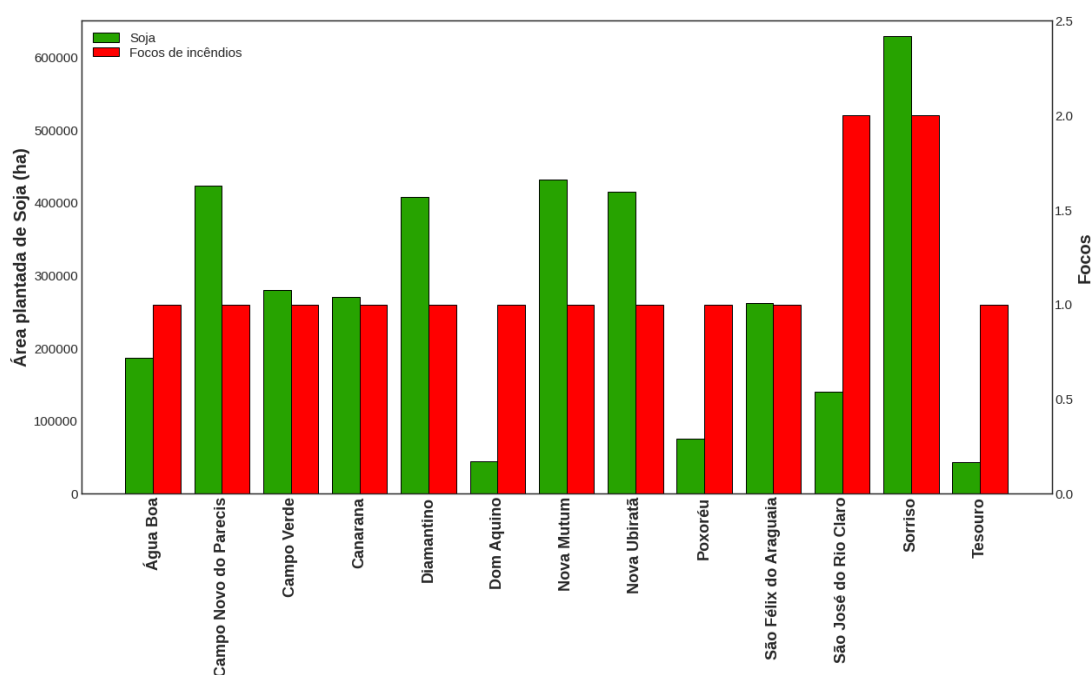
- Topp, Edward, Pattey, Elizabeth, Topp, E, Pattey, E, 2011. Soils as sources and sinks for atmospheric methane. *https://doi.org/10.4141/S96-107* 77, 167–178. <https://doi.org/10.4141/S96-107>
- Tubiello, F.N., Salvatore, M., Ferrara, A.F., House, J., Federici, S., Rossi, S., Biancalani, R., Condor Golec, R.D., Jacobs, H., Flammini, A., Prosperi, P., Cardenas-Galindo, P., Schmidhuber, J., Sanz Sanchez, M.J., Srivastava, N., Smith, P., 2015. The Contribution of Agriculture, Forestry and other Land Use activities to Global Warming, 1990–2012. *Glob Chang Biol* 21, 2655–2660. <https://doi.org/10.1111/GCB.12865>
- Volpato, M., Andrade, C.F., Silva, E.L., Barbosa, M.L., Andrade, M.D., Rocha, P. v., Delgado, R.C., Teodoro, P.E., Silva, C.A., Pereira, M.G., 2022. Fire foci and their spatiotemporal relations to weather variables and land uses in the state of Mato Grosso. *Environ Dev Sustain*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02573-3>
- Wang, J., Li, L., Lam, S.K., Zhang, X., Liu, X., Pan, G., 2018. Changes in nutrient uptake and utilization by rice under simulated climate change conditions: A 2-year experiment in a paddy field. *Agric For Meteorol* 250–251, 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.254>
- Wilkes, A., Reisinger, A., Wollenberg, E.K., Dijk, S. van, 2017. Measurement, reporting and verification of livestock GHG emissions by developing countries in the UNFCCC: current practices and opportunities for improvement.
- Zhang, L., Liu, Z., Ren, T., Liu, D., Ma, Z., Tong, L., Zhang, C., Zhou, T., Zhang, X., Li, S., 2020. Identification of seed maize fields with high spatial resolution and multiple spectral remote sensing using random forest classifier. *Remote Sens (Basel)* 12. <https://doi.org/10.3390/rs12030362>
- Zhao, M., Heinsch, F.A., Nemani, R.R., Running, S.W., 2005. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sens Environ* 95, 164–176. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2004.12.011>
- Zhao, M., Running, S.W., 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science (1979)* 329, 940–943. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1192666/SUPPL_FILE/ZHAO.SOM.REVISION.1.PDF

APÊNDICE (S)

APÊNDICE A. Quantidade de área plantada de soja por município e focos de incêndio em áreas de vegetação nativa substituída por áreas de cultivo de soja no ano de 2020 no Cerrado do MT.



APÊNDICE B. Quantidade de área plantada de soja por município e focos de incêndio em áreas de vegetação nativa substituída por áreas de cultivo de soja no ano de 2021 no Cerrado do MT.



APÊNDICE C. Tabela de dados retirados dos pontos de estudo para data de queimada, CH4, GPP e precipitação utilizados para estudo da pesquisa e dados estatísticos.

ID	ANO	LATITUDE	LONGITUDE	Queimada	Município	Mesoregião	Mediana	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	GPP (mediana)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
1	2020	-16.914	-51.164	26/09/2020	ALTO TAQUARI	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1853.39	0	0	0	0	0	0	1805.5	1843.9	1865.6	1865.6	1865.6	0	3.54	4.920	3.485	4.625	5.885	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026		
2	2020	-17.3436	-50.2046	18/09/2020	ALTO TAQUARI	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1853.39	0	0	0	0	0	0	1816.6	1843.9	1865.6	1865.6	1865.6	0	3.54	4.920	3.485	4.625	5.885	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026		
3	2020	-17.9416	-50.1873	18/09/2020	ALTO TAQUARI	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1849.79	0	0	0	0	0	0	1817.6	1843.9	1865.6	1865.6	1865.6	0	3.14	5.1436	2.275	3.6620	6.175	6.3310	6.3310	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105		
4	2020	-17.3526	-50.2226	18/09/2020	ALTO TAQUARI	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1849.79	0	0	0	0	0	0	1811	1823.9	1865.6	1865.6	1865.6	0	3.14	5.1436	2.275	3.6620	6.175	6.3310	6.3310	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	
5	2020	-17.9416	-50.1873	18/09/2020	ALTO TAQUARI	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1849.79	0	0	0	0	0	0	1811	1823.9	1865.6	1865.6	1865.6	0	3.14	5.1436	2.275	3.6620	6.175	6.3310	6.3310	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	6.4105	
6	2020	-17.1434	-54.5096	08/09/2020	ITUMBURA	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1854.33	0	0	0	0	0	0	1825.5	1843.2	1865.6	1865.6	1865.6	0	2.23	4.375	3.8833	2.475	3.1838	6.175	6.175	6.175	6.175	6.175	6.175	6.175	6.175	6.175	
7	2020	-18.3071	-54.7957	18/07/2020	PONTOCINQUIS	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1844.33	0	0	0	0	0	0	1844.5	1851	1864.7	1864.2	1865.6	0	2.23	3.175	3.3438	3.432	3.2888	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	
8	2020	-18.3071	-54.7957	18/07/2020	PONTOCINQUIS	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1844.33	0	0	0	0	0	0	1844.5	1851	1864.7	1864.2	1865.6	0	2.23	3.175	3.3438	3.432	3.2888	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	6.026	
9	2020	-18.7462	-53.9655	24/03/2020	PEDEIRA PRETA	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1838.41	0	0	0	0	0	0	1834.2	1823.3	1845.6	1842.2	1837.7	0	3.26	8.3803	3.365	3.0525	3.275	5.6255	6.6	4.4375	5.6255	6.6	4.4375	5.6255	6.6	4.4375	
10	2020	-18.4273	-56.5537	31/03/2020	JURICA	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1833.66	0	0	0	0	0	0	1831.9	1845.5	1836.8	1823.4	1842.2	0	3.28	7.2303	6.0888	1.625	2.275	2.8	6.3795	6.6375	4.355	6.6375	6.6375	6.6375	6.6375	6.6375	
11	2020	-18.8801	-56.4423	31/09/2020	JURICA	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1846.86	0	0	0	0	0	0	1824.4	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	2.80	7.7075	2.275	2.38	4.6888	3.875	6.1	7.1055	5.6888	17.80	3.875	0.8888	0.8888	0.8888	
12	2020	-18.8801	-56.4423	31/09/2020	JURICA	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1846.86	0	0	0	0	0	0	1824.4	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	2.80	7.7075	2.275	2.38	4.6888	3.875	6.1	7.1055	5.6888	17.80	3.875	0.8888	0.8888	0.8888	
13	2020	-15.8723	-55.552	31/09/2020	CAMP. VERDE	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1846.70	0	0	0	0	0	0	1835.6	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	2.20	4.3255	2.888	1.58	4.9438	3.042	7.18	6.425	4.313	17.28	3.042	0.213	0.9	0.9	
14	2020	-15.8723	-55.552	31/09/2020	CAMP. VERDE	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1846.70	0	0	0	0	0	0	1835.6	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	2.20	4.3255	2.888	1.58	4.9438	3.042	7.18	6.425	4.313	17.28	3.042	0.213	0.9	0.9	
15	2020	-16.4003	-50.0535	02/04/2020	NOVO SAO JOAQUIM	SUDESTE MATO-GROSSENSE	1846.16	0	0	0	0	0	0	1835.6	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	4.42	6.325	2.875	6.0875	7.4663	6.66	6.102	6.0875	4.8313	3.0775	17.25	0.3025	2.6	2.6	
16	2020	-15.3243	-53.4177	03/04/2020	NOVO SAO JOAQUIM	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1846.16	0	0	0	0	0	0	1835.6	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	3.01	7.4663	5.5625	4.3775	4.3775	2.783	3.51	5.5625	3.1	2.075	17.25	12.375	12.375	12.375	
17	2020	-15.3243	-53.4177	03/04/2020	NOVO SAO JOAQUIM	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1846.16	0	0	0	0	0	0	1835.6	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	3.01	7.4663	5.5625	4.3775	4.3775	2.783	3.51	5.5625	3.1	2.075	17.25	12.375	12.375	12.375	
18	2020	-16.2567	-53.3805	10/06/2020	NOVO SAO JOAQUIM	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1852.64	0	0	0	0	0	0	1831	1810.8	1844.8	1862.6	1845.9	1852.6	0	3.07	3.125	3.875	4.025	3.4427	3.175	5.0775	6.8875	3.7888	2.025	17.888	1.25	15.875	15.875
19	2020	-16.8055	-53.5979	27/02/2020	NOVO SAO JOAQUIM	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1843.41	0	0	0	0	0	0	1831	1810.8	1844.8	1862.6	1845.9	1852.6	0	2.46	6.3505	3.865	2.475	3.4625	2.425	6.15	5.0825	4.313	2.075	17.25	12.375	12.375	12.375
20	2020	-16.8055	-53.5979	27/02/2020	NOVO SAO JOAQUIM	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1843.41	0	0	0	0	0	0	1831	1810.8	1844.8	1862.6	1845.9	1852.6	0	2.46	6.3505	3.865	2.475	3.4625	2.425	6.15	5.0825	4.313	2.075	17.25	12.375	12.375	12.375
21	2020	-16.8055	-53.5979	27/02/2020	NOVO SAO JOAQUIM	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1843.41	0	0	0	0	0	0	1831	1810.8	1844.8	1862.6	1845.9	1852.6	0	2.46	6.3505	3.865	2.475	3.4625	2.425	6.15	5.0825	4.313	2.075	17.25	12.375	12.375	12.375
22	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
28	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31	2020	-14.8628	-53.7557	14/02/2020	SANTO ANTONIO DO LESTE	NOROESTE MATO-GROSSENSE	1842.65	0	0	0	0	0	0	1828.8	1828.1	1824.7	1828.8	1828.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
32	2020	-14.0232	-54.1398	24/09/2020	PARANATINA	NORTE MATO-GROSSENSE	1843.81	0	0	0	0	0	0	1822.9	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	4.54	7.5255	3.1438	2.8625	6.5588	4.688	5.8625	7.45	6.5255	3.810	13.838	0.243	3.105	3.105	
33	2020	-14.0232	-54.1398	24/09/2020	PARANATINA	NORTE MATO-GROSSENSE	1843.81	0	0	0	0	0	0	1822.9	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	4.54	7.5255	3.1438	2.8625	6.5588	4.688	5.8625	7.45	6.5255	3.810	13.838	0.243	3.105	3.105	
34	2020	-14.0232	-54.1398	24/09/2020	PARANATINA	NORTE MATO-GROSSENSE	1843.81	0	0	0	0	0	0	1822.9	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	4.54	7.5255	3.1438	2.8625	6.5588	4.688	5.8625	7.45	6.5255	3.810	13.838	0.243	3.105	3.105	
35	2020	-14.0232	-54.1398	24/09/2020	PARANATINA	NORTE MATO-GROSSENSE	1843.81	0	0	0	0	0	0	1822.9	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	4.54	7.5255	3.1438	2.8625	6.5588	4.688	5.8625	7.45	6.5255	3.810	13.838	0.243	3.105	3.105	
36	2020	-14.0232	-54.1398	24/09/2020	PARANATINA	NORTE MATO-GROSSENSE	1843.81	0	0	0	0	0	0	1822.9	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	4.54	7.5255	3.1438	2.8625	6.5588	4.688	5.8625	7.45	6.5255	3.810	13.838	0.243	3.105	3.105	
37	2020	-14.0232	-54.1398	24/09/2020	PARANATINA	NORTE MATO-GROSSENSE	1843.81	0	0	0	0	0	0	1822.9	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	4.54	7.5255	3.1438	2.8625	6.5588	4.688	5.8625	7.45	6.5255	3.810	13.838	0.243	3.105	3.105	
38	2020	-14.0232	-54.1398	24/09/2020	PARANATINA	NORTE MATO-GROSSENSE	1843.81	0	0	0	0	0	0	1822.9	1843.9	1863.3	1864.1	1854.5	0	4.54	7.5255	3.1438	2.8625	6.5588	4.688	5.8625	7.45							

