

# Ocorrência de focos de calor em anos recentes no Sul da Amazônia Brasileira

*Maria Lucia Ferreira Barbosa<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1.758, CEP 12227-010, SJC- SP, Brasil, maria.lucia@inpe.br.

## Resumo

O objetivo desta pesquisa é caracterizar os padrões de fogo no bioma Amazônia por classe de intensidade e analisar sua relação com chuvas e desmatamento. Para isso, os dados de focos de calor foram categorizados, em nível de intensidade, por meio dos valores da força radiativa do fogo (FRP). Esses focos foram, ainda, categorizados por classe de floresta e desmatamento. A fim de identificar padrões espaciais de ocorrência foi utilizada a estimativa da densidade Kernel. Por fim, foi calculado o coeficiente de correlação de Spearman a fim de avaliar a relação entre a incidência de focos e os totais mensais de chuvas. O ano com mais focos foi 2016, caracterizado por uma seca intensa na região Amazônica. A grande maioria dos focos (normais e extremos) ocorreram em áreas desmatadas. Além disso, os focos estiveram mais concentrados nas áreas de transição para o Cerrado e na porção Noroeste do estado. Foi encontrada alta correlação entre os focos de calor e as quantidades de chuvas. Esta interação entre, focos de calor, desmatamento e climas secos pode aumentar a atividade de fogo, levando a degradação, a longo prazo, dos fragmentos florestais remanescentes. A metodologia aqui utilizada sobre a classificação dos focos de calor deve levar em consideração as características de cada local e, portanto, a mesma deve ser validada e adaptada de acordo.

***Palavras-chave*** - Amazônia, Fogo, desmatamento, VIIRS, Densidade Kernel.

## 1 INTRODUÇÃO

Devido as características de clima úmido e chuvoso na Amazônia, a incidência de fogo natural pode ser considerada raro na região. Dessa forma, a dinâmica de fogo na região Amazônica é impactada, principalmente por atividades antrópicas, tais como, desmatamento, atividades ligadas a agricultura, manutenção de pastagens e abertura de estradas (Laurence et al., 2014), que é agravada por condições de clima propícios ao fogo, como baixa ocorrência de chuvas e altas temperaturas (Caúla et al., 2015).

O desmatamento pode ser considerado um dos principais fatores que aumentam a suscetibilidade das florestas ao fogo. Além disso, é uma das razões para mudanças no ciclo hidrológico e energético na região Sul da bacia amazônica (Davidson et al., 2012; Aragão et al., 2014). Além da influência direta, com o uso do fogo para limpeza de áreas recém desmatadas, o desmatamento fragmenta as florestas, tornando-as vulneráveis ao fogo proveniente de áreas próximas (Alvarado et al., 2014).

Nos últimos anos, a interação entre atividades humanas e eventos climáticos extremos tem aumentado a recorrência de grandes incêndios florestais na Amazônia (Lewis et al., 2011; Marengo & Espinoza, 2016). O ano de 2015, por exemplo, registrou uma das maiores anomalias de temperatura das últimas décadas, sendo provavelmente o ano mais quente do século passado (Jiménez-Muñoz et al. 2016). Além disso, outros estudos discutem as causas e impactos das secas, além do consequente aumento na incidência de fogo em anos recentes (Yang et al., 2018; Shi et al., 2019).

Diante disto, o conhecimento dos padrões espaciais de fogo e suas relações com outras variáveis são de extrema importância a medida que podem subsidiar o estabelecimento de áreas prioritárias no monitoramento e controle do fogo, além de ampliar o conhecimento acerca da incerta resposta das florestas Amazônicas às mudanças climáticas e mudanças de uso e cobertura da terra.

Nesse contexto, a proposta desta pesquisa é caracterizar os padrões de fogo no bioma Amazônia por classe de intensidade e analisar sua relação com chuvas e desmatamento. Mais detalhadamente a pesquisa tem por objetivo: 1. gerar um diagnóstico inicial de intensidade de fogo para o bioma Amazônia, 2. quantificar as categorias de fogo por classe de Floresta e Desmatamento. 3. mapear o padrão da ocorrência de focos de calor por meio da densidade Kernel e 4. analisar a relação entre a quantidade de chuvas e a ocorrência de focos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende o bioma Amazônia localizado no estado do Mato Grosso (Figura 1). Conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), a área da Amazônia no Mato Grosso é de 480.215 km<sup>2</sup>, correspondendo a 53,5% do estado (Borges et al. 2014).

A região está dividida em dois domínios climáticos (Alvares et al. 2013), um predominante, Am (tropical úmido) e outro em menor proporção, Aw (tropical com inverno seco) (Figura 1). O bioma Amazônia é caracterizado por duas estações climáticas, uma seca (maio a setembro) e outra chuvosa (outubro a abril). Os maiores níveis de chuvas anuais no Mato Grosso são registrados na porção amazônica, no Norte do estado (Souza et al. 2013).

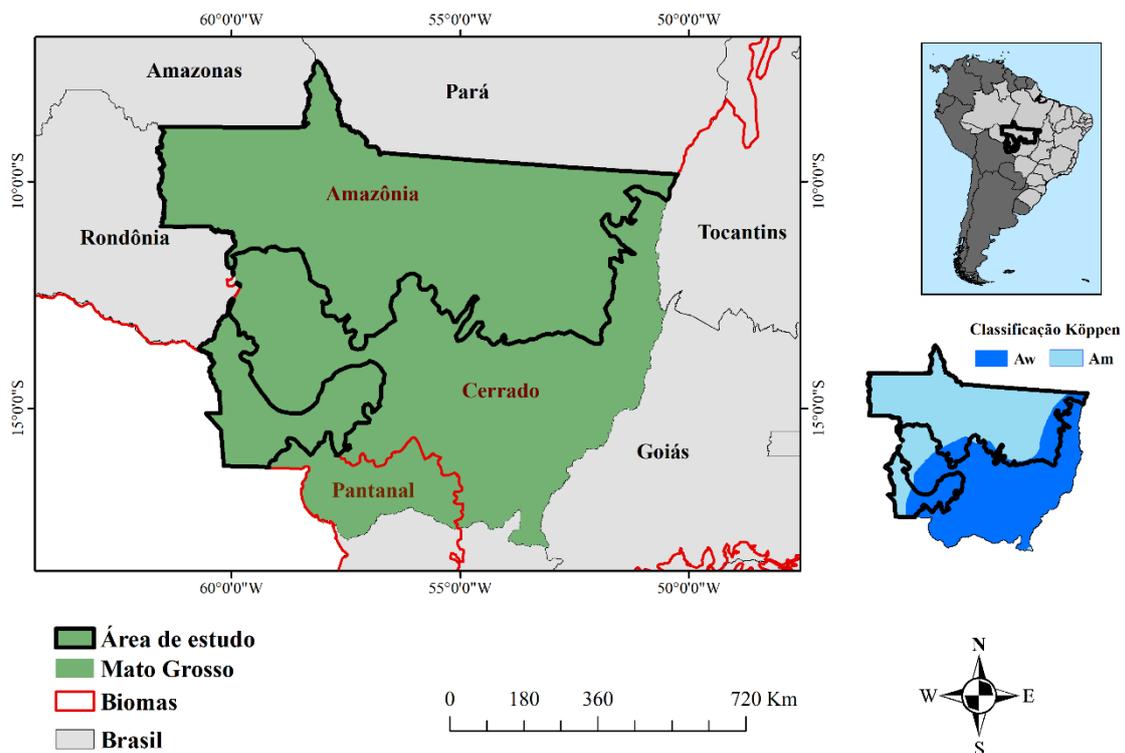


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo.

## 2.2 Conjunto de dados

Os dados utilizados nesta pesquisa constam na Tabela 1, são eles: (1) focos de calor, (2) uso e cobertura da terra, (3) área queimada, (4) chuvas, (5) desmatamento. Todos os dados foram obtidos para o período de 2013 a 2018. Além disso, todos os dados foram convertidos para projeção Lat/Long e sistema geodésico WGS84 a fim de compatibilizar com os dados de focos de calor que são disponibilizados com essas características.

Tabela 1. Resumo das características do conjunto de dados utilizado.

| <b>Dados</b>   | <b>Resolução espacial</b> | <b>Tipo</b> | <b>Fonte</b> |
|----------------|---------------------------|-------------|--------------|
| Focos de calor | 375m                      | Vetorial    | Sensor VIIRS |
| Chuvas         | 5km                       | Matricial   | CHIRPS       |
| Desmatamento   | 30m                       | Vetorial    | PRODES       |

Os dados serão abordados, separadamente, em mais detalhes, a seguir.

### 2.2.1 Focos de calor

Foi utilizado o produto de focos de calor do sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) a bordo do satélite *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (Suomi NPP). Este produto possui uma resolução espacial de 375 metros e possui abrangência temporal de 20 de janeiro de 2012 até o momento presente. Além disso, o mesmo está disponível na plataforma *Fire Information for Resource Management System – FIRMS* (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>). O sensor VIIRS trouxe melhorias, quando comparado ao sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), na detecção de focos de calor, principalmente com a melhoria da resolução espacial e aumento da largura da faixa de varredura (UMD, 2020).

### 2.2.2 Uso e Cobertura da terra

Os dados de desmatamento acumulado e de floresta foram oriundos do projeto PRODES referente ao programa de monitoramento do desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por satélite. O projeto produz, desde 1988, as taxas anuais de desmatamento na Amazônia e realiza o monitoramento do desmatamento por corte raso na região. Atualmente o PRODES utiliza imagens dos satélites LANDSAT 8/OLI, CBERS 4 e IRS-2 porém independente do instrumento utilizado, a área mínima mapeada é de 62,5 km<sup>2</sup>. Além disso,

### 2.2.3 Chuvas

Os dados de chuvas (mm) foram obtidos do *Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS). Este é um conjunto de mais de 30 anos de dados pluviométricos quase globais com resolução espacial de 5 quilômetros. O CHIRPS utiliza dados provenientes de satélites em conjunto com dados de estações meteorológicas para criar séries temporais de chuva. Foi utilizada a versão 2.0 que está disponível desde 2015.

## 2.3 Métodos

Inicialmente, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk de normalidade nos dados de focos de calor e de chuvas, disponível na função *shapiro.test* do software R. O valor-p para os focos e chuva foram de  $7,543 \times 10^{-11}$  e  $8,502 \times 10^{-05}$ , respectivamente. Assim, para ambos os conjuntos de dados, a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, não é possível inferir que os dados possuam distribuição normal. Dessa forma, foram adotadas técnicas de análise não paramétricas, o coeficiente de correlação de Spearman e a densidade kernel, pois ambos não pressupõem normalidade dos dados. A Figura 2 mostra um resumo dos métodos utilizados.

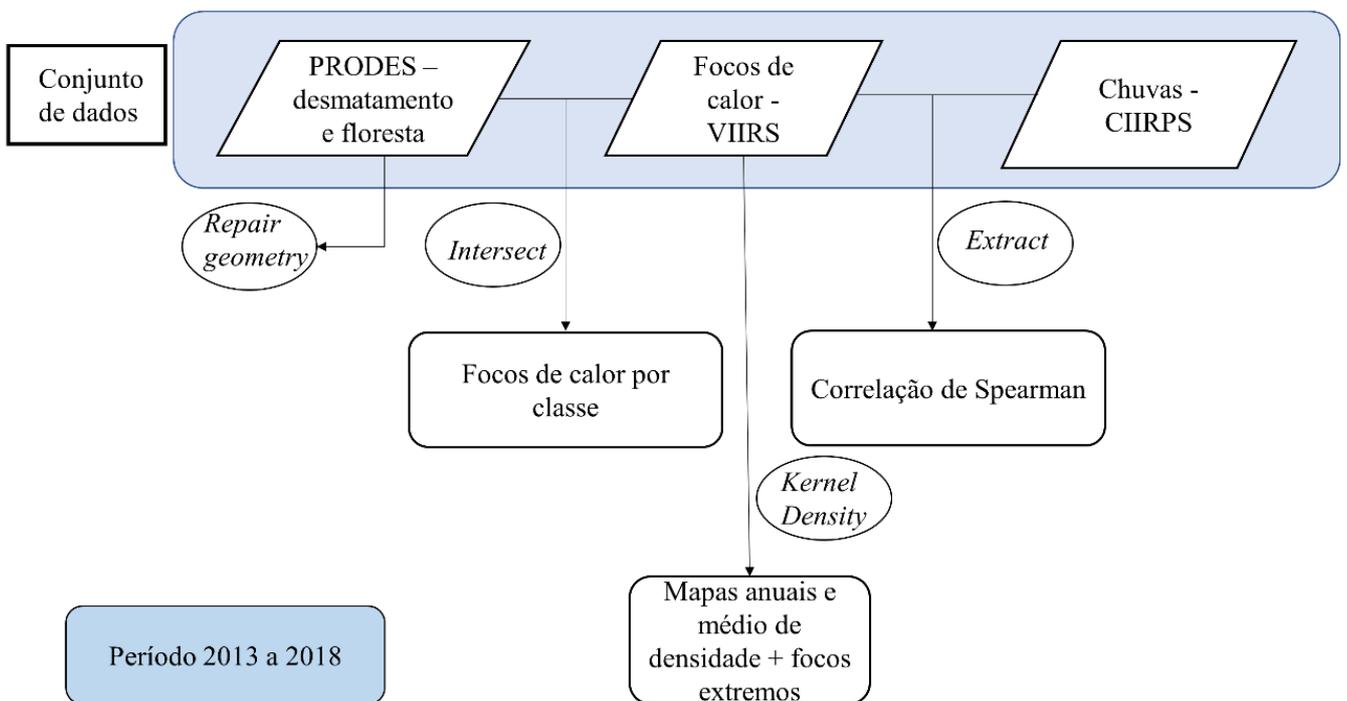


Figura 2. Fluxograma da metodologia utilizada.

### 2.3.1 Categorização dos focos de calor

A categorização dos focos de calor por classe de intensidade foi realizada a partir da metodologia proposta por Tedim et al. (2018) e a base dessa classificação se encontra na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação da intensidade de fogo com base nos valores de FRP.

| Categorias de fogo | FRP* MWm <sup>-1</sup> | Capacidade de controle |
|--------------------|------------------------|------------------------|
| Fogo normal        | 1                      | < 0,5                  |
|                    | 2                      | 0,5-2                  |
|                    | 3                      | 2 - 4                  |
|                    | 4                      | 4 - 10                 |
| Fogo extremo       | 5                      | 10 - 30                |
|                    | 6                      | 30 - 100               |
|                    | 7                      | > 100                  |

Fonte. Tedim et al. (2018). \*Força radiativa do fogo.

Os valores de Força Radiativa do Fogo (FRP) são obtidas a partir da tabela de atributos dos dados de focos de calor. Esta é uma medida diretamente ligada a quantidade de combustível consumida nos incêndios (Mataveli *et al.*, 2015) e, apesar de ser uma medida estática, pode ser utilizada como uma medida de intensidade de fogo (Ichoku *et al.*, 2008).

Para a classificação dos focos em áreas desmatadas e em áreas de floresta, inicialmente, foi utilizada a função *repair geometry* disponível no software ArcGis 10.8. Esta função tem como objetivo remover erros topológicos que podem ocorrer nos dados, como auto intersecções, partes vazias, vértices duplicados, entre outros.

Com os arquivos devidamente corrigidos foi aplicada a função *intersect*, também do ArcGis, entre os focos de calor e os dados do PRODES, anualmente. A função *intersect* calcula uma interseção geométrica em arquivos *shapefile* em que quando um atributo se sobrepõe em todas as camadas, o mesmo é salvo no arquivo de saída. O resultado é uma tabela com os dados de focos de calor e seus atributos em relação as classes de floresta e o desmatamento acumulado. A partir disso, os dados foram tabulados de acordo com a classe e limites de FRP

### 2.3.2 Densidade Kernel

A fim de mapear o padrão de ocorrência de focos de calor foi utilizado o estimador de densidade Kernel, que plota a intensidade pontual de um fenômeno correspondente ao raio e influência do mesmo. Este estimador está disponível na função *Kernel Density* do software ArcGis. O método de classificação utilizado foi o *Natural breaks (Jenks)* que é um método de classificação de dados projetado para determinar o melhor arranjo de valores em diferentes classes. Isso é feito procurando minimizar o desvio médio de cada classe em relação à média da classe, enquanto maximiza o desvio de cada classe em relação às médias das outras classes (Esri, 2019).

A estimativa da densidade Kernel, é um método estatístico não-paramétrico que é útil no estabelecimento de padrões de ocorrência de incêndios espaciais em nível de paisagem (Koutsias et al., 2004) pois converte os pontos de ignição de incêndios em superfícies de densidade contínua. A imprecisão de localização associada aos registros de incêndios torna a transformação em dados contínuos mais eficaz na espacialização dos mesmos. Diversos estudos utilizam a densidade Kernel para estimar a densidade de eventos de fogo (Koutsias et al., 2014; dos Santos et al., 2017; Barbosa et al., 2018; de Andrade et al., 2019).

Foram gerados mapas anuais que foram classificados, em cor e tonalidade, da seguinte forma: vermelho (densidade muito alta), laranja (alta), amarela (média), verde claro (baixa) e verde escuro (muito baixa). Além disso, a partir da álgebra de mapas, foi gerado um mapa médio de densidade para o período em estudo. Neste mapa foi incluído a malha do sistema viário da região a fim de relacionar a ocorrência de estradas com concentração de focos de calor. Os mapas interpolados pela densidade Kernel foram gerados na mesma resolução dos focos de calor, 375 metros, e sua função (quadrática) foi expressa por Silverman (1986):

$$Densidade = \frac{1}{(raio)^2} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{3}{\pi} * \left( 1 - \left( \frac{dist_i}{raio} \right)^2 \right)^2 \right] \quad \text{Para } dist_i < raio \quad (1)$$

em que:  $i=1, \dots, n$  são os pontos de entrada. O somatório inclui os pontos dentro do raio de distância (raio), raio é um parâmetro de distância, chamado de largura de banda e  $dist$  é a distância entre o ponto  $i$  e a posição  $(x,y)$ .

A fórmula é, então, calculada para cada local onde você deseja estimar a densidade. Como um raster está sendo criado, os cálculos são aplicados ao centro de cada célula no raster de saída. A largura de banda pode ser definida pelo operador ou calculada automaticamente, através, da seguinte fórmula (Esri,2019):

$$Largura \text{ de banda} = 0,9 * \min(SD, \sqrt{\frac{1}{\ln(2)} * D_m}) * n^{-0,2} \quad (2)$$

em que:  $D_m$  é a distância media (ponderada) do centro médio (ponderado),  $n$  é o número de pontos e  $SD$  é a distância padrão calculada por meio de outra fórmula padrão. O min na equação indica que será usado o menor valor encontrado entre  $SD$  e  $\sqrt{\frac{1}{\ln(2)} * D_m}$ .

Por fim, os focos de calor extremos foram espacializados a partir dos mapas de Kernel. Inicialmente, os focos de calor foram transformados em formato matricial com base em seus valores de FRP, a partir do método do valor mais frequente, ou seja, foi associado ao pixel, o valor de FRP mais frequente naquela posição. Posteriormente, os mapas foram reclassificados em duas classes de focos: normais (1) e extremos (2) em que na classe 1 foram agregadas as categorias 1 a 4 e na classe 2 de 5 a 7. Apenas a classe 2 foi utilizada nos mapas.

### 2.3.3 Correlação de Spearman

O coeficiente de correlação avalia com que intensidade a relação entre duas variáveis pode ser descrita pelo uso de uma função monótona. O coeficiente varia de -1 a 1 em que quanto mais próximo de -1 mais forte será a relação inversa entre as variáveis e quanto mais próximo de 1 maior será a relação direta entre elas. Valores próximos a 0 indicam pouca ou nenhuma relação entre as variáveis. A equação do coeficiente de correlação de Spearman está apresentada, a seguir (Zar, 2005):

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n^3 - n} \quad (3)$$

em que  $d_i$  é a diferença em postos de cada observação  $x_i$  e  $y_i$  e  $n$  é o número de observações.

Para o cálculo do coeficiente de correlação, os focos de calor foram contabilizados, mensalmente, por pixel, utilizando uma grade baseada nos dados de chuva (5x5 km). Para isso foi utilizada a função *count* que é um argumento da função *rasterize* do software R. Essa função transfere valores de pontos para células de um raster. Após isso, um raster de chuva foi convertido em pontos em que o ponto central de cada pixel foi salvo em uma grade de pontos por meio da função *rasterToPoints* do R. Por fim foi aplicada a função *extract*, também disponível no R, para extrair a contagem de focos por pixel para pontos da grade e também para extrair os valores de chuva para esses mesmos pontos. Para cada mês foi calculada a média de chuvas (mm/mês) para os pontos em que foram contabilizados focos de calor. O coeficiente de correlação foi calculado com base nessa média mensal e o total de focos nesses pontos, com um total de 72 observações ( $n$ ).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A categorização anual dos focos de calor, por intensidade, consta na Tabela 3. O ano com mais focos foi 2016, dentre as possíveis razões pode-se citar a influência do fenômeno El Niño que em 2015/2016 foi considerado de intensidade muito forte, causando secas extremas na região amazônica (Jiménez-Muñoz et al, 2016). Já o ano com menos focos foi 2018 que pode ter sofrido influência do fenômeno La Niña, caracterizado pelo aumento de chuvas na região amazônica. Os totais de chuvas nesses anos foram de aproximadamente 1854 e 2229 mm, respectivamente, evidenciando uma considerável diferença pluviométrica entre os anos.

As classes de intensidade de fogo consideradas extremas (5 a 7), representaram a menor porção do total de focos. Neste sentido, 2017 foi o ano com mais focos considerados extremos.

Tabela 3. Número de focos de calor por categoria de intensidade de fogo.

| <b>Categorias de fogo</b> | <b>2013</b>  | <b>2014</b>   | <b>2015</b>   | <b>2016</b>   | <b>2017</b>   | <b>2018</b>  |
|---------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| 1                         | 1373         | 1716          | 1398          | 33045         | 1431          | 1186         |
| 2                         | 21029        | 32208         | 32032         | 28699         | 33768         | 18091        |
| 3                         | 11918        | 18471         | 20491         | 18143         | 21975         | 10896        |
| 4                         | 24534        | 34666         | 38772         | 33045         | 36847         | 23553        |
| 5                         | 15921        | 24798         | 27146         | 21955         | 27390         | 16250        |
| 6                         | 4380         | 8809          | 8892          | 7658          | 10202         | 5153         |
| 7                         | 806          | 1846          | 1982          | 1644          | 2176          | 1144         |
| <b>Total</b>              | <b>79961</b> | <b>122514</b> | <b>130713</b> | <b>144189</b> | <b>133789</b> | <b>76273</b> |

Ao avaliar os focos de calor por áreas desmatadas e de floresta (Tabela 4), é possível observar que a grande maioria dos focos se encontra em áreas desmatadas, seja no ano de estudo ou em anos anteriores. A maioria dos focos ocorreram em áreas desmatadas em anos anteriores, o que traduz o impacto do desmatamento e abandono de áreas mesmo anos depois. Tendo em vista que fogo natural na Amazônia é um evento raro, o desmatamento aliado a uma política ineficaz de controle do fogo podem ser os principais fatores que explicam a ocorrência de fogo e sua variabilidade na região. Além disso, anos mais secos, como 2016 e 2017 foram os que mais registraram focos em áreas de floresta, evidenciando a vulnerabilidade das florestas em períodos de clima seco (Brando et al, 2014).

Em relação aos focos extremos (Tabela 5), mais de 60% dos focos, em todos os anos, ocorreram em áreas desmatadas. O extenso desmatamento gera fragmentação da floresta aumentando, assim, a susceptibilidade da mesma a entrada do fogo proveniente de áreas adjacentes. Alvarado et al. (2004), em uma série de experimentos, encontraram aumento da flamabilidade em florestas próximas a áreas que utilizam o fogo como forma de limpeza e manutenção para pasto no estado do Mato Grosso.

Tabela 4. Número de focos de calor por categoria de fogo e classe de desmatamento e floresta.

| 2013               |                                 |                     |              | 2014               |                                 |                     |              |
|--------------------|---------------------------------|---------------------|--------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|--------------|
| Categorias de fogo | Desmatamento em anos anteriores | Ano de desmatamento | Floresta     | Categorias de fogo | Desmatamento em anos anteriores | Ano de desmatamento | Floresta     |
| 1                  | 1032                            | 60                  | 224          | 1                  | 1202                            | 65                  | 345          |
| 2                  | 13953                           | 1398                | 4472         | 2                  | 18543                           | 2212                | 9857         |
| 3                  | 7275                            | 819                 | 2565         | 3                  | 10214                           | 1251                | 5750         |
| 4                  | 15608                           | 1545                | 4796         | 4                  | 21133                           | 2008                | 8776         |
| 5                  | 9841                            | 1152                | 3508         | 5                  | 14509                           | 1596                | 6971         |
| 6                  | 2374                            | 415                 | 1245         | 6                  | 4495                            | 870                 | 2933         |
| 7                  | 330                             | 143                 | 292          | 7                  | 811                             | 307                 | 649          |
| <b>Total</b>       | <b>50413</b>                    | <b>5532</b>         | <b>17102</b> | <b>Total</b>       | <b>70907</b>                    | <b>8309</b>         | <b>35281</b> |
| 2015               |                                 |                     |              | 2016               |                                 |                     |              |
| Categorias de fogo | Desmatamento em anos anteriores | Ano de desmatamento | Floresta     | Categorias de fogo | Desmatamento em anos anteriores | Ano de desmatamento | Floresta     |
| 1                  | 961                             | 74                  | 259          | 1                  | 870                             | 109                 | 336          |
| 2                  | 18280                           | 2724                | 8379         | 2                  | 14026                           | 2209                | 10610        |
| 3                  | 10658                           | 1859                | 5460         | 3                  | 8816                            | 1341                | 6348         |
| 4                  | 22386                           | 2539                | 8593         | 4                  | 17967                           | 2319                | 9192         |
| 5                  | 15425                           | 1924                | 6584         | 5                  | 11957                           | 1455                | 6294         |
| 6                  | 4482                            | 910                 | 2589         | 6                  | 3672                            | 813                 | 2519         |
| 7                  | 911                             | 355                 | 575          | 7                  | 701                             | 253                 | 607          |
| <b>Total</b>       | <b>73103</b>                    | <b>10385</b>        | <b>32439</b> | <b>Total</b>       | <b>58009</b>                    | <b>8499</b>         | <b>35906</b> |
| 2017               |                                 |                     |              | 2018               |                                 |                     |              |
| Categorias de fogo | Desmatamento em anos anteriores | Ano de desmatamento | Floresta     | Categorias de fogo | Desmatamento em anos anteriores | Ano de desmatamento | Floresta     |
| 1                  | 912                             | 70                  | 323          | 1                  | 772                             | 90                  | 234          |
| 2                  | 15563                           | 2284                | 13158        | 2                  | 10433                           | 2320                | 4180         |
| 3                  | 9547                            | 1586                | 8357         | 3                  | 6150                            | 1287                | 2429         |
| 4                  | 19189                           | 2510                | 10783        | 4                  | 14041                           | 2454                | 4585         |
| 5                  | 14526                           | 1734                | 8159         | 5                  | 9184                            | 1920                | 3605         |
| 6                  | 5031                            | 799                 | 3498         | 6                  | 2567                            | 794                 | 1443         |
| 7                  | 956                             | 346                 | 735          | 7                  | 450                             | 338                 | 325          |
| <b>Total</b>       | <b>65724</b>                    | <b>9329</b>         | <b>45013</b> | <b>Total</b>       | <b>43597</b>                    | <b>9203</b>         | <b>16801</b> |

Tabela 5. Focos de calor (%) considerados extremos por classe de desmatamento e floresta.

| Focos extremos (%) |                                 |                     |          |
|--------------------|---------------------------------|---------------------|----------|
| Ano                | Desmatamento em anos anteriores | Ano de desmatamento | Floresta |
| 2013               | 65                              | 8,86                | 26,14    |
| 2014               | 59,79                           | 8,37                | 31,84    |
| 2015               | 61,67                           | 9,45                | 28,88    |
| 2016               | 57,76                           | 8,92                | 33,32    |
| 2017               | 65                              | 8,86                | 26,14    |
| 2018               | 59,15                           | 14,80               | 26,05    |

A partir dos mapas de densidade Kernel (Figura 3), é possível identificar áreas com maiores concentrações de focos de calor. Em todos os anos, os focos estiveram mais concentrados na porção Noroeste e Central da área de estudo, evidenciando áreas prioritárias no que se refere ao manejo do fogo.

Os focos extremos se encontram espalhados na área de estudo em todos os anos, exceto 2013, que apresentou alta concentração de focos extremos nas regiões de densidade muito alta de focos. Isto pode indicar que os limites propostos por Tedim et al. (2018), podem não ser efetivos no diagnóstico de incêndios extremos nesta região. Silva Junior et al. (2018), utilizaram um limite a partir de  $50 \text{ MWm}^{-1}$  para classificar intensidade de fogo em região no estado do Pará, valor acima do estabelecido por Tedim na primeira classe de fogo extremo. Kganyago et al. (2020), também encontraram padrão de focos extremos espalhados pelo Brasil, porém a média de FRP identificada como de alta intensidade foi de  $356,77 \text{ MWm}^{-1}$ .

Um outro ponto é de que os focos extremos nem sempre estão ligados a incêndios extremos na região Amazônica (Bowman et al., 2017). Em regiões do globo mais suscetíveis a incêndios extremos, como a Austrália, valores de FRP menores podem indicar incêndios de maiores proporções do que quando o mesmo valor é associado a região Amazônica. Portanto, classificações de intensidade de fogo com base em valores de FRP devem ser usadas com cautela em Florestas Amazônicas. Por outro lado, as árvores em florestas tropicais não possuem características de adaptação ao fogo, portanto, mesmo um incêndio considerado de baixa intensidade pode ser letal para muitas espécies e, assim, pode contribuir para a degradação gradual das mesmas.

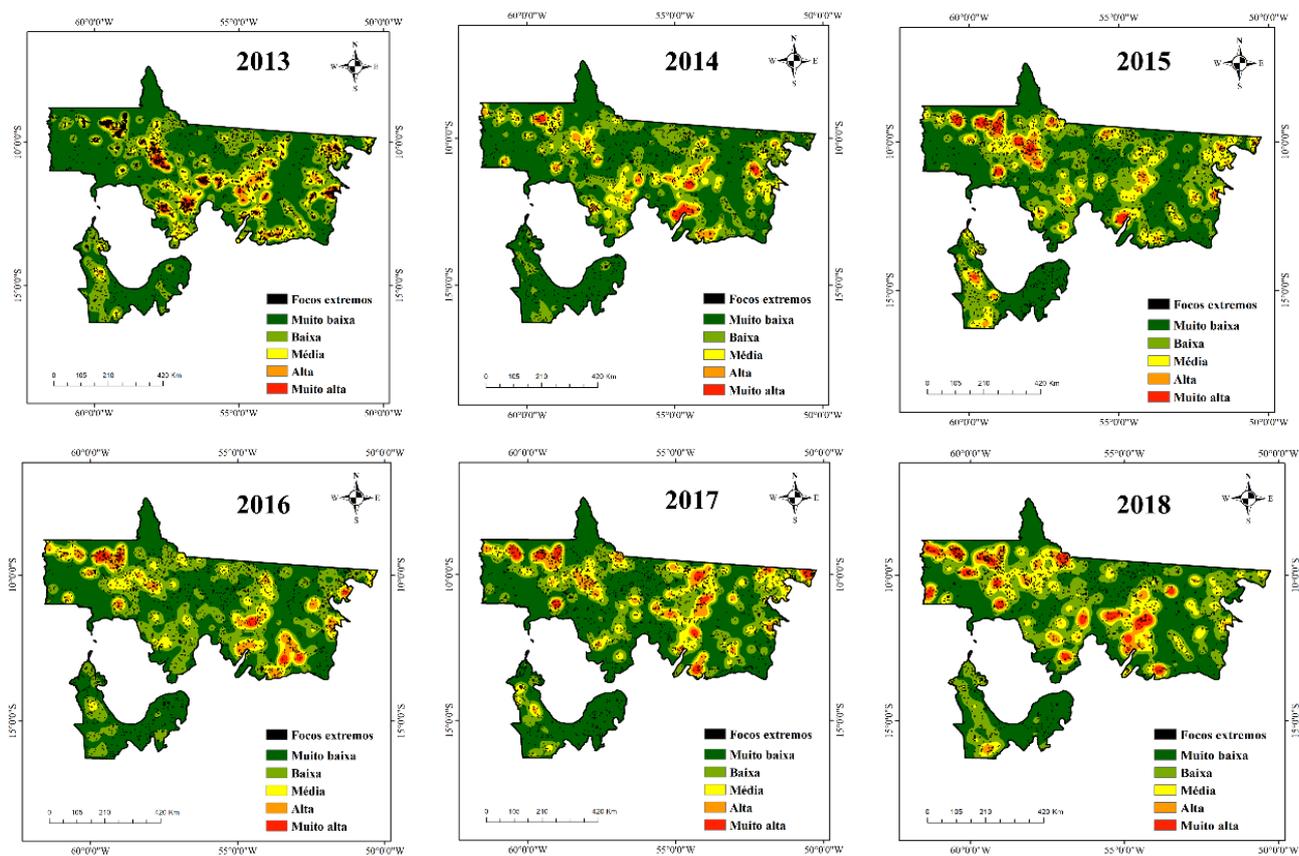


Figura 3. Mapas anuais de densidade Kernel e localização de focos considerado extremos.

O mapa médio de densidade Kernel (Figura 4), apresenta os locais que mais concentraram focos ao longo dos anos. Ainda que as manchas de densidade variem de tamanho (Figura 2), os locais de maior concentração se repetem ano a ano. Além disso, a maioria das manchas de densidade alta se encontram em áreas que contém vias de acesso. Barber et al. (2014), apontaram que 95% do desmatamento na região amazônica se encontra próximo a vias de acesso (rodovias e rios navegáveis) o que pode aumentar a ocorrência de focos nesses locais. Além disso, também é próximo de vias que as Florestas se tornam mais vulneráveis a entrada de fogo devido aos efeitos de borda e fragmentação (Silva Junior et al., 2018).

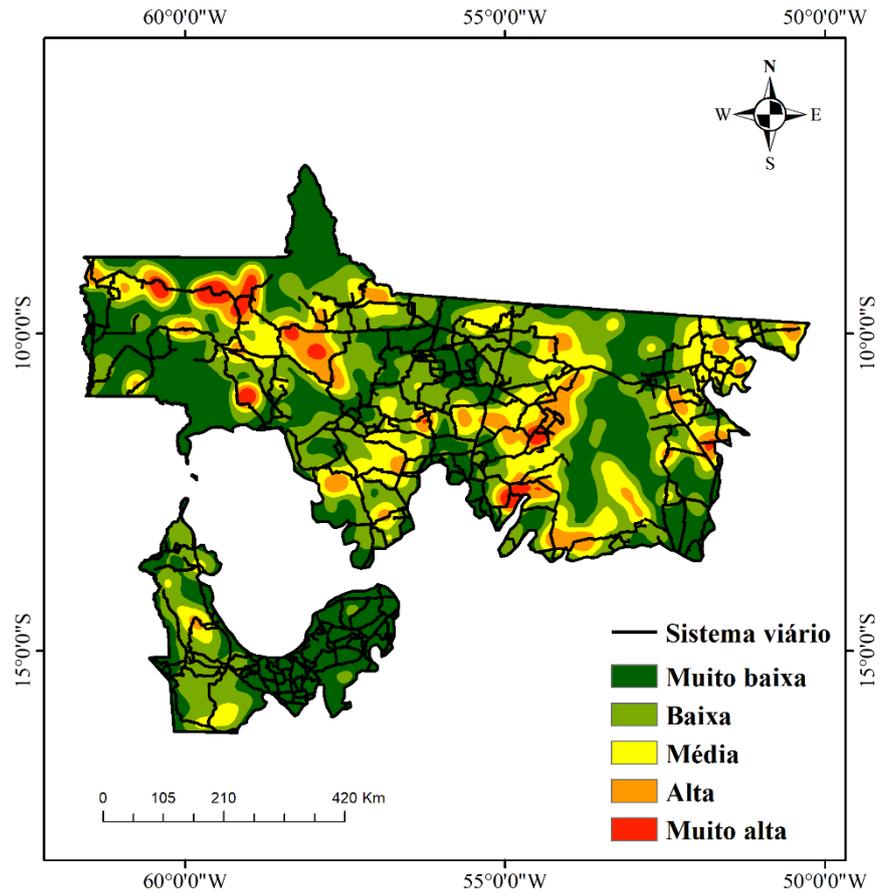


Figura 4. Mapa médio (2013-2018) de densidade Kernel e malha viária na área de estudo.

A sazonalidade do fogo já é conhecida na Amazônia e coincide com a estação seca na região. A Figura 5 demonstra como os picos de fogo ocorrem, durante a estação seca, nos meses imediatamente posteriores aos com menores quantidades de chuvas. Aragão et al. (2008), encontraram relação semelhante com picos de focos 6 meses após o pico da estação chuvosa.

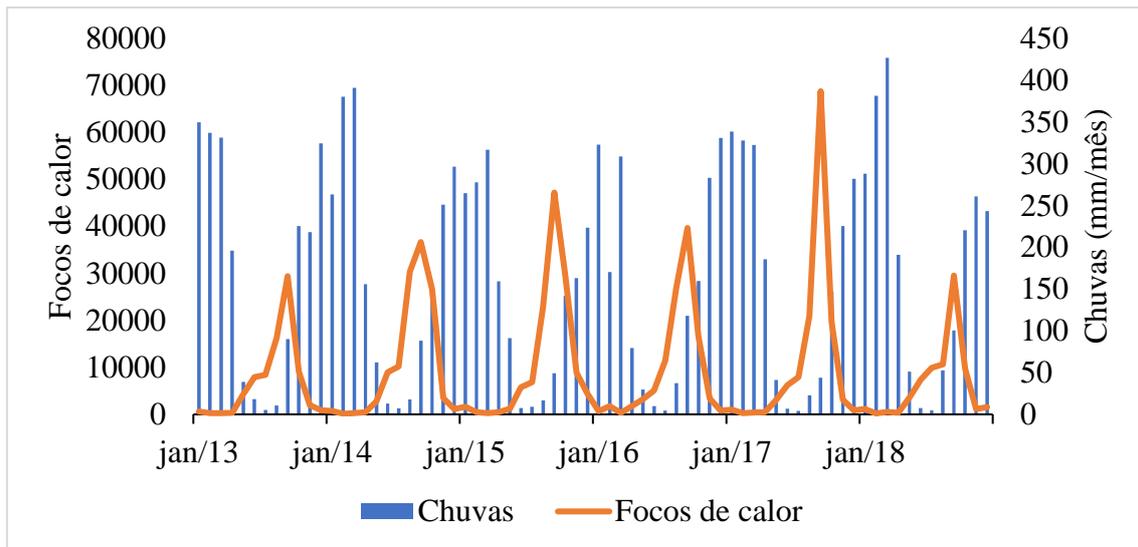


Figura 5. Número de focos de calor e quantidade de chuvas mensais para o período de estudo.

O diagrama de dispersão da relação entre a contagem de focos de calor por célula de grade e a quantidade de chuvas registradas nesses pontos é apresentado na Figura 6. Uma forte correlação não linear pode ser observada, com um coeficiente de Spearman de  $-0,72$ . Resultados semelhantes foram encontrados por Lima et al. (2017) também para a região Amazônica. Baixas quantidades de chuvas estão ligadas a altas temperaturas e ambas costumam ocorrer durante a temporada de fogo na Amazônia (Lima et al., 2017). Condições climáticas favoráveis associadas ao constante desmatamento na região aumenta a preocupação sobre a dinâmica do fogo na Amazônia.

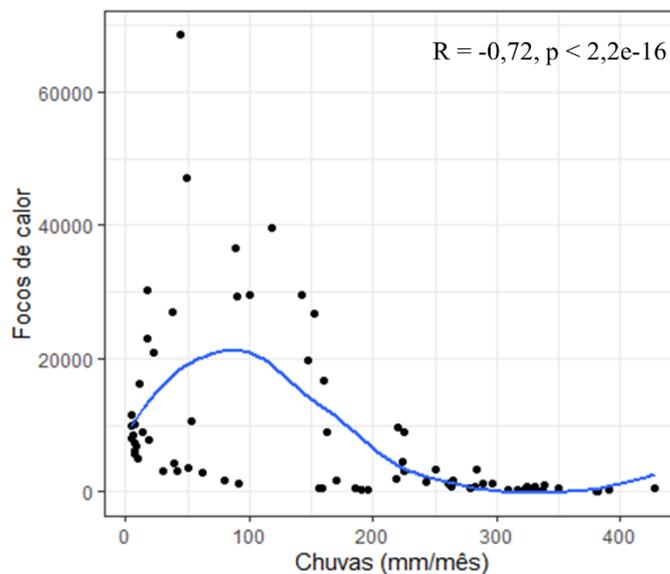


Figura 6. Diagrama de dispersão e coeficiente de correlação de Spearman entre o número de focos de calor e quantidade de chuva (mm/mês).

#### 4 INCERTEZAS

Os dados de focos de calor aqui utilizados não diferenciam sobre o número de queimadas ativas, os tipos de queimadas ou se as ignições ocorreram no dia registrado ou em dias anteriores. Recentemente foi disponibilizado um produto (<https://globalfiredata.org/pages/amazon-dashboard/>) que faz essa diferenciação, sendo assim, recomendado a utilização do mesmo para análises futuras. Além disso, a diferença na resolução espacial dos dados do sensor VIIRS e do PRODES pode causar erros de deslocamento na localização dos focos.

Na estimativa de densidade Kernel, deve-se apontar, que a definição automática da largura de banda pode influenciar nos resultados já que este é um parâmetro que define a influência dos pontos vizinhos na função. Uma escolha errônea da largura de banda poderá gerar superfícies descontínuas ou muito amaciadas, portanto, os resultados obtidos na presente pesquisa devem ser utilizados com cautela. Recomenda-se, no futuro, o uso de técnicas para uma estimativa precisa deste parâmetro.

#### 5 CONCLUSÃO

O ano com mais focos de calor foi 2016, caracterizado por uma seca intensa na região Amazônica. A grande maioria dos focos (normais e extremos) ocorreram em áreas desmatadas, evidenciando o papel do desmatamento na dinâmica do fogo. Além disso, os

focos estiveram mais concentrados nas áreas de transição para o Cerrado e na porção Noroeste do estado. O Noroeste do estado é uma região que sofre bastante com o desmatamento e as áreas de transição para o Cerrado compreendem florestas mais secas e, portanto, mais propícias a entrada do fogo. Foi encontrada alta correlação entre os focos de calor e as quantidades de chuvas. Esta interação entre, focos de calor, desmatamento e climas secos pode aumentar a atividade de fogo, levando a degradação, a longo prazo, dos fragmentos florestais remanescentes. A metodologia aqui utilizada sobre a categorização dos focos de calor é importante como uma primeira proposta de intensidade de fogo, porém deve-se levar em consideração as características de cada local e, portanto, a mesma deve ser validada e adaptada de acordo.

## REFERÊNCIAS

- Alvarado, E., Sandberg, D. V., de Carvalho Jr, J. A., Gielow, R., & Santos, J. C. (2004). Landscape fragmentation and fire vulnerability in primary forest adjacent to recent land clearings in the Amazon arc of deforestation. *Floresta*, 34(2).
- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, et al (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol Zeitschrift* 22:711–728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Aragao, L. E. O., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., & Saatchi, S. (2008). Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1498), 1779-1785.
- Barbosa, M. L. F., Delgado, R. C., Teodoro, P. E., Pereira, M. G., Correia, T. P., De Mendonça, B. A. F., & De Ávila Rodrigues, R. (2018). Occurrence of fire foci under different land uses in the State of Amazonas during the 2005 drought. *Environment, Development and Sustainability*, v. 20, p. 1-14.
- Brando, P. M., Balch, J. K., Nepstad, D. C., Morton, D. C., Putz, F. E., Coe, M. T., ... & Alencar, A. (2014). Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(17), 6347-6352.

- Bowman, D. M. J. S., Williamson, G. J., Abatzoglou, J. T., Kolden, C. A., Cochrane, M. A., & Smith, A. M. S. (2017). Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nature Ecology & Evolution*, 1(3), 0058.
- Caúla, R. H., Oliveira-Júnior, J. F., Lyra, G. B., Delgado, R. C., & Heilbron Filho, P. F. L. (2015). Overview of fire foci causes and locations in Brazil based on meteorological satellite data from 1998 to 2011. *Environmental Earth Sciences*, 74(2), 1497–1508.
- De Andrade, C. F., Duarte, J. B., Barbosa, M. L. F., de Andrade, M. D., de Oliveira, R. O., Delgado, R. C., ... & Teodoro, P. E. (2019). Fire outbreaks in extreme climate years in the State of Rio de Janeiro, Brazil. *Land Degradation & Development*, 30(11), 1379-1389.
- Dos Santos, S. M. B., Bento-Gonçalves, A. J., & De Mello Baptista, G.M. (2017) Quantificação e avaliação dos focos de calor no parque nacional da chapadadiamantina e entorno no período de 2007 a 2016. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(4).
- Esri, What's new in ArcGIS 10 (2019). Arcgis 10.8 help.
- Ichoku, C., Giglio, L., Wooster, M.J., Remer, L.A. (2008). Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. *Remote Sens. Environ.* 112, 2950–2962.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., ... & Van Der Schrier, G. (2016). Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific reports*, 6, 33130.
- Kganyago, M., & Shikwambana, L. (2020). Assessment of the Characteristics of Recent Major Wildfires in the USA, Australia and Brazil in 2018–2019 Using Multi-Source Satellite Products. *Remote Sensing*, 12(11), 1803.
- Koutsias, N., kalabokidis, K. D., & Allgwer, B. (2004). Fire occurrence patterns at landscape level: beyond positional accuracy of ignition points with kernel density estimation methods. *Natural Resource Modeling*.

- Koutsias, N., Balatsos, P., & Kalabokidis, K. (2014). Fire occurrence zones: kernel density estimation of historical wildfire ignitions at the national level. Greece. *Journal of Maps*, v. 10 n. 4, p. 630-639.
- Laurance, W. F., Sayer, J., & Cassman, K. G. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends in ecology & evolution*, 29(2), 107-116, 2014.
- Lima, C. H., AghaKouchak, A., & Randerson, J. T. (2018). Unraveling the role of temperature and rainfall on active fires in the Brazilian Amazon using a nonlinear Poisson model. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(1), 117-128.
- Lewis, S.L., Brando, P.M., Phillips, O.L., van der Heijden, G.M.F., Nepstad, D.C., 2011. The 2010 Amazon drought. *Science* 331, 554 554.
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033-1050.
- Mataveli, G. A. V. et al. (2015). Relationship between the viewing angle and the Fire Radiative Power estimation. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 21, n. 2, p. 371–388.
- Shi, M., Liu, J., Worden, J. R., Bloom, A. A., Wong, S., & Fu, R. (2019). The 2005 Amazon drought legacy effect delayed the 2006 wet season onset. *Geophysical Research Letters*, 46(15), 9082-9090.
- Silva Junior, C., Aragão, L., Fonseca, M., Almeida, C., Vedovato, L., & Anderson, L. (2018). Deforestation-Induced Fragmentation Increases Forest Fire Occurrence in Central Brazilian Amazonia. *Forests*, 9(6), 305.
- Souza AP De, Lima L, Zamadei T, et al (2013). Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. *Nativa* 1:34–43. doi: 10.14583/2318-7670.v01n01a07
- Silverman, B. W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis*. [s.l: s.n.] v. 37.
- Tedim, Fantina, et al. (2018). "Defining extreme wildfire events: difficulties, challenges, and impacts." *Fire* 1.1.

Tedim, F., Leone, V., Coughlan, M., Bouillon, C., Xanthopoulos, G., Royé, D., ... & Ferreira, C. (2020). Extreme wildfire events: The definition. In *Extreme Wildfire Events and Disasters*. Elsevier. p. 3-29.

University of Maryland, (2020). VIIRS vs MODIS. Disponível em: <<http://viirsfire.geog.umd.edu/pages/viirsvsmodis.php>>. Acesso em: ago de 2020.

Yang, J., Tian, H., Pan, S., Chen, G., Zhang, B., & Dangal, S. (2018). Amazon drought and forest response: Largely reduced forest photosynthesis but slightly increased canopy greenness during the extreme drought of 2015/2016. *Global Change Biology*, 24(5), 1919–1934.

Zar, J. H. (2005). Spearman rank correlation. *Encyclopedia of Biostatistics*, 7.