

## **Análise do padrão de distribuição espacial de queimadas no Bioma Pantanal**

Nickolas Mendes de Matos<sup>1</sup>  
Fabricio Assis Leal<sup>1</sup>  
Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Brasília – UnB  
Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Florestal  
CEP 70910-900 – Brasília – DF, Brasil  
{nickolas.matos, fabricioassisleal}@gmail.com  
ematricardi@unb.br

**Abstract.** The objective of this work is to analyze through non-parametric statistical pattern of spatial distribution of fires occurring in the Pantanal, based on Ripley's K function and the kernel density estimator. The events considered in the analysis correspond to the centroid of the burned areas, which were obtained by the MODIS product MCD45A1, from 2003 to 2013. The spatial pattern of fires varied in different scales. The values obtained indicate rejection of the hypothesis of complete spatial randomness (CSR), as the observed values of L remain outside the confidence interval and the upper limit of the interval therefore have clustered spatial pattern, where the scale maximum clustering was 77 km. Subsequently, from this scale defined by the K function was generated a density map of the distribution of fires. In the analyzed period, the south and central region of the biome, specifically the city of Corumbá/MS and a small part of Porto Murtinho/MS county showed regions with very high density of fires; no Conservation Units are found inserted in areas taken with very high density of fires; only four units are in areas with high density; and other units are located in regions with low and very low density of burned areas. Based on the results, it is possible to aim prevention and forest fires fight policies in specific areas, with a minimum radius of 77 km of action.

**Palavras-chave:** spatial statistics, forest fires, kernel density estimator, Ripley's K function, estatística espacial, incêndios florestais, estimador de densidade kernel, função K de Ripley.

### **1. Introdução**

Entre os vários problemas ambientais enfrentados pelo Brasil, as queimadas estão entre as principais, uma vez que as emissões dos gases resultantes da queima da biomassa colocam o país entre os principais responsáveis pelo lançamento de gases do efeito estufa no planeta. Além de contribuir com o aquecimento global e consequente mudanças climáticas, causam inúmeros prejuízos econômicos, sociais e ambientais, perda da biodiversidade, desertificação e desflorestamento (IBAMA, 2013).

Neste contexto, existe a necessidade de se avançar continuamente no controle às queimadas em ambientes naturais, o que motiva a produção de tecnologias que proporcionem o monitoramento da ocorrência das queimadas. Os sistemas de informações geográficas (SIG), com dados oriundos de sensoriamento remoto, podem proporcionar uma visão geral da distribuição temporal, espacial e identificar padrões dos incêndios florestais em diferentes escalas (Pereira et al., 2012).

De acordo com Fernandes et al. (2011), a grande maioria dos estudos conduzidos no Brasil atuam principalmente na detecção de queimadas e não na construção de cenários que possibilitem apontar áreas susceptíveis a ocorrência desse fenômeno. Assim, o uso de técnicas de análise espacial se mostra como importante ferramenta que possibilita a identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de queimadas (Pereira et al., 2013).

O estudo da análise espacial proporciona percepção visual da distribuição do fenômeno analisado, além de mensurar propriedades e relacionamentos, permiti a tradução dos padrões existentes e contribui para a compreensão do fenômeno (Druck et al., 2004). Segundo Silva et al. (2013), a frequência, intensidade, proporção e o período de ocorrência, evidenciam as características históricas dos incêndios.

Neste sentido, é imprescindível estabelecer políticas de prevenção e combate aos incêndios florestais. Entretanto, é preciso conhecer o perfil das queimadas, isto é, saber onde ocorrem para definir as regiões de maior risco e estabelecer prioritariamente para essas regiões, programas mais intensivos de prevenção e combate (Soares e Batista, 2007).

O objetivo do presente trabalho é utilizar análises estatísticas não-paramétricas para descrever o padrão de distribuição espacial de incêndios florestais no bioma Pantanal de 2003 a 2013, respondendo as seguintes questões: quais as regiões mais críticas em relação a ocorrência de queimadas e se a Unidades de Conservação estão localizadas em tais regiões.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1. Área de estudo

O bioma Pantanal cobre uma área estimada de 150.355 km<sup>2</sup>, ocupando 1,76% da área total do território brasileiro (IBGE, 2004), e está localizado entre os paralelos 15° e 22° de latitude sul e entre os meridianos 55° e 59° de longitude oeste (Allem e Valls, 1987).

No Brasil, o Pantanal distribui-se pelos estados de Mato Grosso (35%) e Mato Grosso do Sul (65%) e continua pela Argentina, pequenas partes da Bolívia e Paraguai, onde é chamado de Chaco. O Pantanal é a maior planície inundável do mundo e contém importante riqueza de diversidade biológica terrestre e aquática. A altitude é de aproximadamente 150 metros em relação ao nível do mar e o relevo é plano. No período seco, o Pantanal se assemelha ao cerrado. Entretanto, no período de chuvas, modifica-se drasticamente, com a formação de grandes áreas alagadas (até 80% da planície se inunda). Os ecossistemas que o bioma abriga são extremamente frágeis e estão sob a ameaça das novas tendências de desenvolvimento econômico e de construção de infraestrutura (SFB, 2014).

O clima é fortemente sazonal, com temperatura média anual em torno de 25°C, entre os meses de setembro a dezembro as temperaturas máximas absolutas ultrapassam 40°C (PCBAP, 1997).

### 2.2. Base de dados

Neste trabalho foram utilizados os dados obtidos pelo mapeamento temporal das queimadas ocorridas no bioma Pantanal, por meio do produto MODIS MCD45A1, no mês de setembro de 2003 a 2013. O produto MODIS MCD45A1 disponibilizado mensalmente, com nível 3 de processamento e resolução espacial de 500 m, oferece a informação da quantidade de área queimada, bem como o nível de confiabilidade da informação (Boschetti et al., 2013).

O evento considerado no estudo consistiu no centroide de cada polígono de áreas queimadas, mapeadas pelo produto, os quais foram gerados a partir da ferramenta *Feature to Point* disponível no *software* ArcGIS 10. O termo evento está associado a algum tipo de fenômeno localizável no espaço, dentro de uma escala de investigação e que possa ser representado por pontos (Pereira et al., 2013), cuja localização foi gerada por mecanismos estocásticos (Druck et al., 2004).

### 2.3. Função K de Ripley

A função K de Ripley, também conhecida como medida de momento de segunda ordem reduzido (Druck et al., 2004), é uma ferramenta que pode ser utilizada para resumir o padrão de distribuição de eventos, testar hipóteses sobre esse padrão, estimar parâmetros e ajustar modelos (Dixon, 2002). Matematicamente, pode ser definido como (Equação 1):

$$\hat{K}(h) = \hat{\lambda}^{-1} E[n^{\circ} \text{ de pontos contidos a uma distância } h \text{ de um ponto arbitrário}] \quad (1)$$

Onde, E[ ] é um operador de esperança matemática e  $\hat{\lambda}$  é uma medida de primeira ordem que representa a intensidade ou número médio de eventos por unidade de área com raio  $h$ . A

estimativa de  $K$  é calculada em função de um raio “ $h$ ” e é resultante da intensidade de eventos que ocorrem nessa área definida. De acordo com Druck et al. (2004), o estimador  $\hat{K}$  pode ser representado pela Equação 2:

$$\hat{K}(h) = \frac{A}{N^2} \sum_i^N \sum_{j, i \neq j}^N \frac{I_h(d_{ij})}{w_{ij}} \quad (2)$$

Onde,  $A$  é a área da região considerada a um raio  $h$ ,  $N$  é o número de eventos observados,  $I_h(d_{ij})$  é uma função indicatriz cujo o valor é 1 se  $(d_{ij}) \leq h$  e 0 caso contrário, e  $w_{ij}$  é a proporção da circunferência do círculo centrado no evento  $i$  que está dentro da região.

Utilizou-se a função  $K$  de Ripley para avaliar a distribuição espacial dos eventos em diferentes escalas simultaneamente, por meio do *software CrimeStat 3.3*. Foram realizadas 99 simulações para construir os intervalos de confiança (envelopes) com os resultados máximos e mínimos, através das simulações de Monte Carlo. O erro admitido foi dado por  $(1/(m+1))$ , onde “ $m$ ” é o número de simulações, portanto, o nível de confiança utilizado foi de 1% de erro. Basicamente, a estimativa da função univariada  $K$ , possibilita testar a hipótese de completa aleatoriedade espacial (CAE), assim, é possível investigar a possibilidade do padrão de distribuição espacial do evento se comportar de forma agrupado, aleatória ou regular (Pereira et al., 2013).

Para melhor analisar os dados, utilizou-se a função transformada  $\hat{L}(h)$ , que é uma forma de comparar a estimativa  $K$  de um conjunto de dados observados com  $\pi h^2$  e facilitar a interpretação gráfica. A função transformada  $\hat{L}(h)$  é definida como (Equação 3):

$$\hat{L}(h) = \sqrt{\frac{\hat{K}(h)}{\pi}} - h \quad (3)$$

O gráfico de  $\hat{L}(h)$ , em função da distância  $h$ , indica uma atração espacial, ou agrupamento, entre os eventos com valores positivos, ou seja, se todos os valores observados de  $\hat{L}(h)$  estiverem acima do intervalo de confiança (envelopes) e forem positivos, o agrupamento está em toda a escala considerada no estudo. Os valores negativos indicam repulsão espacial (regularidade) entre os eventos na escala, assim, estimativas negativas que estiverem abaixo do intervalo de confiança inferior, apresentam regularidade em toda a escala. Valores dentro do intervalo de confiança são considerados aleatórios (Pereira et al., 2013).

#### 2.4. Estimador de densidade *Kernel*

É comum o uso de estimadores de densidade para analisar as propriedades de uma série de dados. Essas estimativas podem indicar características importantes, como assimetria e multimodalidade dos dados. Em alguns casos podem apontar caminhos para mais investigações (Silverman, 1986). O estimador *Kernel* é um método estatístico não paramétrico e tem sido muito utilizado para mapear ocorrências de incêndios (De La Riva et al., 2004).

De acordo com Silverman (1986), o estimador de densidade *Kernel* pode ser definido como (Equação 4):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K \left\{ \frac{x - X_i}{h} \right\} \quad (4)$$

Onde,  $n$  é o número de pontos observados;  $h$  é a largura de banda;  $K$  é a função *Kernel*;  $x$  é o vetor de coordenada que representa a localização do ponto estimado; e  $X_i$  é o vetor da  $i$ -ésima coordenada que representa cada ponto observado em relação ao estimado.

De acordo com Druck et al. (2004), a análise do comportamento espacial dos eventos deve começar pela estimativa da intensidade de ocorrência do processo pontual em toda a área de interesse, o qual é muito útil para fornecer uma visão geral da distribuição espacial dos eventos considerados

Por meio da ferramenta *Kernel Density* do *software* ArcGIS 10, foi gerado mapa de densidade de ocorrência de incêndios florestais através do método estimador de densidade *Kernel*, o qual possibilita visualizar espacialmente o padrão de densidade dos eventos considerados no estudo, ou seja, converte os eventos pontuais em dados de superfície contínua. A ferramenta disponível no ArcGIS 10, utiliza a função quadrática descrita por Silverman (1986), expressa como (Equação 5):

$$K(x) = \begin{cases} 3\pi^{-1}(1 - x^T x)^2 & \text{se } x^T x < 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

Onde,  $x$  é o conjunto de dados multivariados cuja densidade será estimada.

É preciso definir a largura de banda ( $h$ ), vizinhança do ponto a ser interpolado, o qual controla o grau de alisamento da superfície gerada. Entretanto, é muito difícil definir esse valor de forma subjetiva, o que pode gerar resultados ambíguos, pois os valores dependem da escala adotada e das características específicas da área estudada (De La Riva, et al., 2004; Amatulli et al., 2007). De acordo com Liu et al. (2010), a função  $K$  e o estimador *Kernel* podem ser combinados perfeitamente para identificar o padrão de distribuição espacial de um histórico de incêndios florestais. Desta forma, considerou-se como largura de banda ( $h$ ) o valor da escala que representar o agrupamento máximo dos eventos segundo a função  $K$  de Ripley.

Para melhor representação e análise dos resultados da interpolação, definiu-se cinco (5) classes de densidade: 1) muito baixa, 2) baixa, 3) média, 4) alta e 5) muito alta (Silva et al., 2013).

### 3. Resultados e Discussão

O resultado gráfico da função  $K$  para o total de áreas queimadas no período analisado está apresentado na Figura 1.

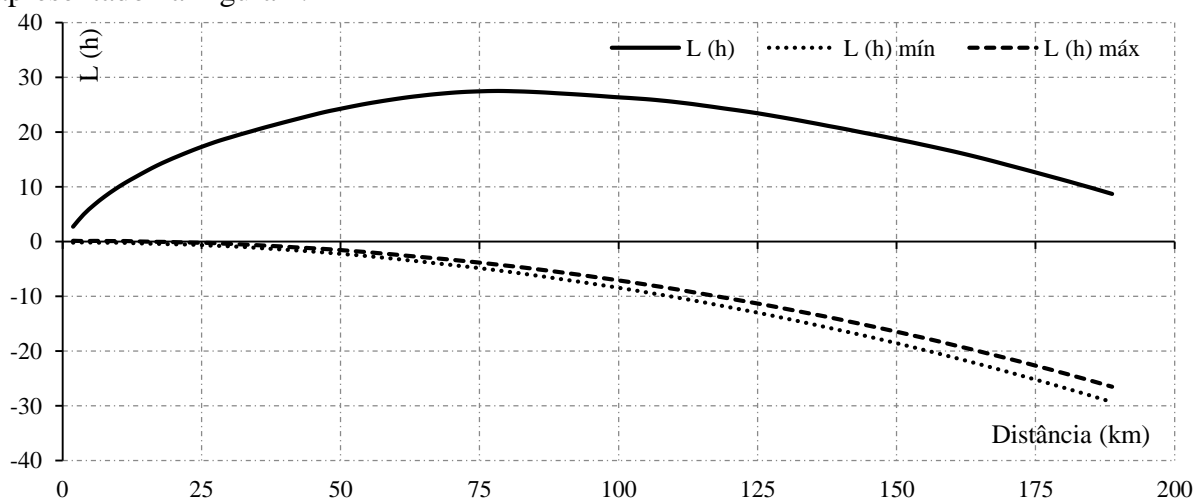


Figura 1. Função  $K$  de Ripley para as queimadas no bioma Pantanal de 2003 a 2013.

Observa-se que o padrão de distribuição espacial dos incêndios variou em diferentes escalas. Os valores obtidos apontam para a rejeição da hipótese de Completa Aleatoriedade Espacial (CAE), pois os valores observados de  $\hat{L}$  permanecem fora do intervalo de confiança e estão acima do limite superior do intervalo, portanto, apresentam um padrão agrupado de distribuição espacial.

Até aproximadamente 77 km, o valor observado de  $\hat{L}$  é máximo, ou seja, os eventos estão mais fortemente agrupados. A partir de 77 km até aproximadamente 188 km, o padrão de distribuição apresenta um grau menor de agrupamento, o qual decresce suavemente. Portanto, a escala que melhor define o padrão de agrupamento das queimadas ocorridas no Pantanal é de 77 km.

De acordo com Pereira et al. (2013), o padrão de distribuição agrupado das queimadas pode estar relacionado ao emprego do fogo como prática de manejo e condições de uso do solo, as quais favorecem a ocorrência de forma agregada e em regiões específicas. Fuentes-Santos et al. (2013), apontam que a distribuição espacial de queimadas dificilmente será completamente aleatória, pois a ocorrência destas em áreas específicas dependem de uma série de fatores relacionados com o tipo de proteção, práticas de prevenção, características da região e gestão das florestas. Yang et al. (2006), ao utilizar a função  $K$  em seu estudo, aponta que o padrão de agrupamento observado entre a ocorrência de queimadas, não necessariamente sugere que exista uma forte dependência espacial, mas pode ser explicado pelos fatores ambientais, como por exemplo a distribuição da vegetação.

A partir da melhor escala definida pela função  $K$ , foi gerado um mapa de densidade da distribuição de queimadas, por meio do método *Kernel*, o qual demonstra onde a ocorrência de queimadas apresentou maior densidade “hot bed” ou menor densidade “cold bed”, indicando visualmente que as ocorrências das queimadas não apresentam padrão completamente aleatório no bioma Pantanal (Figura 2).

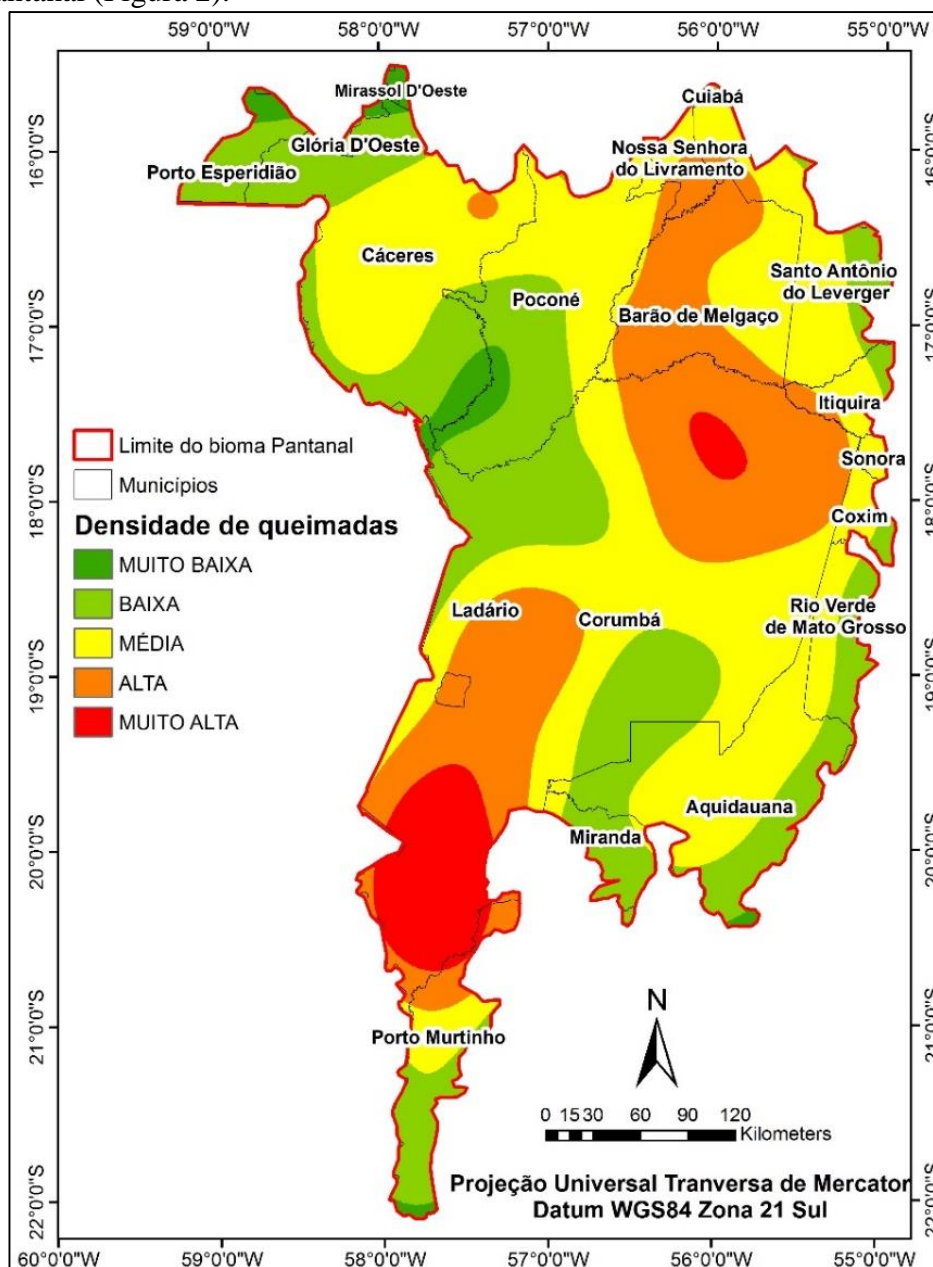


Figura 2. Mapa de densidade de queimadas no bioma Pantanal.

O mapa de *Kernel* representa o resultado da interpolação dos eventos considerados na análise (áreas queimadas), onde se observa a intensidade pontual de ocorrência destes no bioma Pantanal. Manchas com densidade muito alta, em cor vermelha, foram estimadas na região sul e central do Bioma, majoritariamente no município de Corumbá/ MS e uma pequena parte no município de Porto Murtinho/MS. A classe de densidade alta, representada pela cor laranja, ocorre em boa parte da região sul, nordeste e em uma pequena porção mais ao norte do bioma, grande parte nos municípios de Corumbá/MS, Barão de Melgaço/MT e Ladário/MS. As regiões de densidade média, baixa e muito baixa, aparecem mais distribuídas ao longo de quase todo o bioma, concentrando-se em alguns locais.

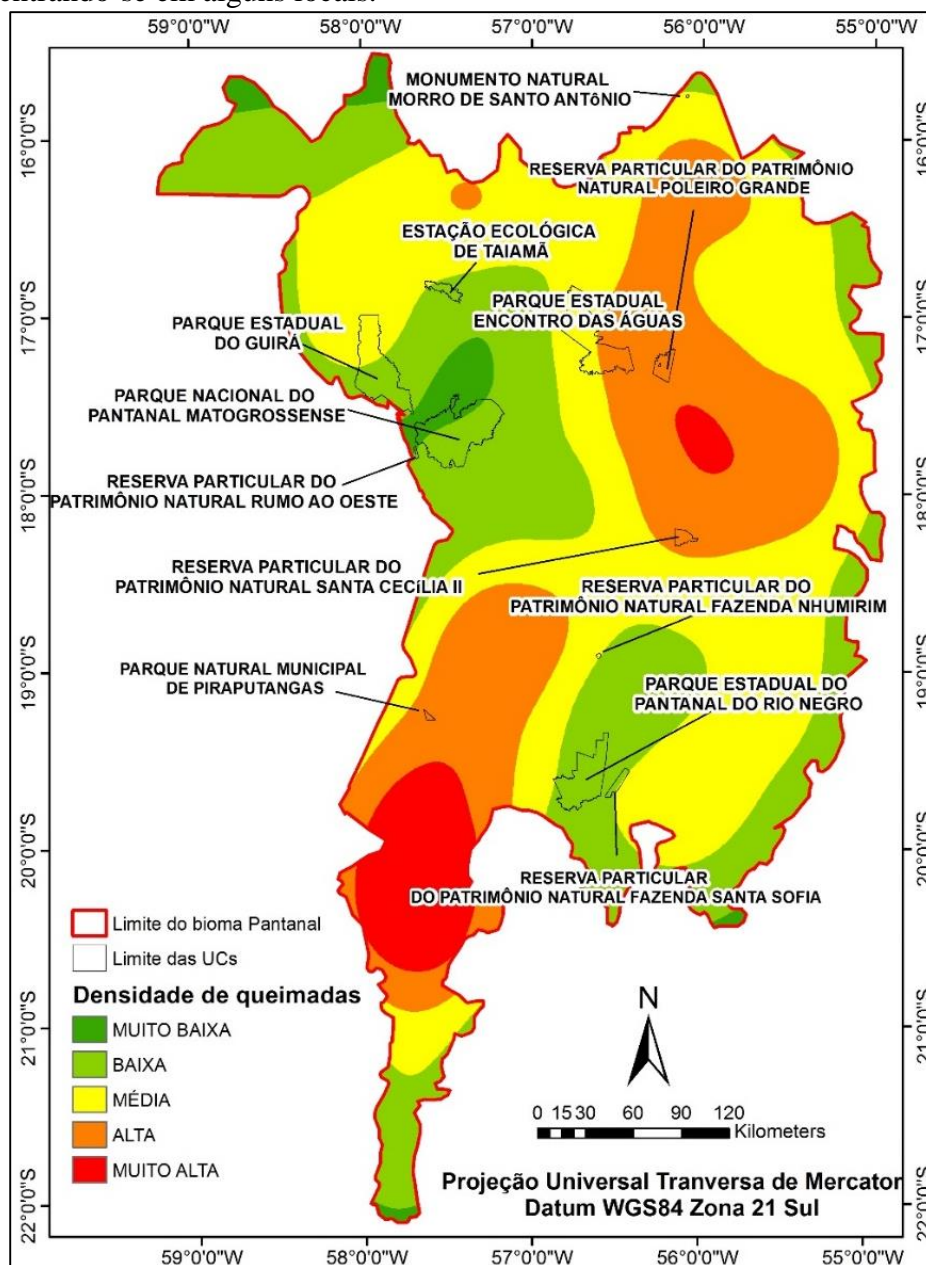


Figura 3. Mapa de densidade das queimadas e as Unidades de Conservação presentes no Bioma Pantanal

Encontram-se inseridas no Pantanal 12 Unidades de Conservação (UC), nas categorias de Parque, Reserva Particular do Patrimônio Natural, Estação Ecológica e Monumento Natural (Figura 3). Ao se analisar a localização das UCs existentes no Bioma em relação as classes de densidade, percebe-se que nenhuma unidade encontra-se inserida em região com densidade

muito alta de áreas queimadas. Nas áreas com alta densidade de queimadas encontram-se quatro (4) UCs: Reserva Particular do Patrimônio Natural Poleiro Grande, parte do Parque Estadual Encontro das Águas, Reserva Particular do Patrimônio Natural Santa Cecília II e Parque Natural Municipal de Piraputangas. O Parque Estadual do Pantanal do Rio Negro, o Parque Nacional do Pantanal Matogrossense, Estação Ecológica de Taiamã e grande parte do Parque Estadual do Guirá estão localizados nas regiões com densidade baixa e muito baixa de áreas queimadas.

#### 4. Conclusões

A função  $K$  pode ser utilizada para analisar o padrão de distribuição espacial de eventos em multiescala e o estimador de densidade *Kernel* pode ser utilizado para representar visualmente esses padrões. Portanto, os dois métodos combinados se mostraram eficientes, uma vez que é possível estimar espacialmente a densidade de um dado evento, com base na sua escala de distribuição.

A partir dos métodos utilizados neste trabalho, foi possível apontar as regiões mais críticas, isto é, com maior densidade de ocorrência de queimadas, além de identificar a escala de agrupamento destes eventos. Portanto, é possível direcionar as políticas de prevenção e combate aos incêndios florestais nestas áreas específicas, onde a escala de atuação mínima adotada deve ser de aproximadamente 77 km.

No período analisado, a região sul e central do Bioma, especificamente o município de Corumbá/MS e uma pequena parte no município de Porto Murtinho/MS, apresentaram regiões com densidade muito alta de queimadas; nenhuma Unidade de Conservação encontrou-se inserida em áreas tidas com densidade muito alta de queimadas; apenas quatro unidades estão em regiões com densidade alta; e as outras unidades estão localizados nas regiões com densidade baixa e muito baixa de áreas queimadas.

#### Referências Bibliográficas

Allem, A.C.; Valls, J.F.M. **Recursos forrageiros nativos do Pantanal Mato-Grossense**. Brasília: EMBRAPA-CENARGEN, 1987. 339 p.

Amatulli, G., Pérez-Cabello, F., De La Riva, J. Mapping lightning/human-caused wildfires occurrence under ignition point location uncertainty. **Ecological Modelling**, 200, 321–333, 2007.

Boschetti, L.; Roy, D.; Hoffmann, A. A.; Humber, M. **MODIS Collection 5.1 Burned Area Product - MCD45. User's Guide**. Version 3.0.1. 2013.

De La Riva, J., Pérez-Cabello, F., Lana-Renault, N., Koutsias, N. Mapping forest fire occurrence at a regional scale. **Remote Sensing of Environment**, 92, 363–369, 2004.

Dixon, P. M. Ripley's  $K$  function. **Encyclopedia of Environmetrics**. 1(3): 1796-1803. 2002.

Druck, S.; Carvalho, M. S.; Câmara, G.; Monteiro, A. M. V. Análise espacial de dados geográficos. Brasília: EMBRAPA, 2004. 209 p.

Fernandes, M. C.; Coura, P. H. F.; Sousa, G. M.; Avelar, A. S. Avaliação geoecológica de susceptibilidade à ocorrência de incêndios no estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Floram - Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 3, p. 299-309, 2011.

Fuentes-Santos, I., Marey-Pérez, M. F., Gonzáles-Manteiga, W. Forest fire spatial pattern analysis in Galicia (NW Spain). **Journal of Environmental Management** 128, 30-42, 2013.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/prevfogo>> Acesso em: 22.out.2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/biomas>> Acesso em: 20.ago.2014.

Liu, W.; Wang, S.; Zhou, Y.; Zhang, S. Spatial distribution patterns analysis of historical forest fires in DaXingAn mountains of China. **International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010)**, p. 634-638, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, DOS RECURSOS HÍDRICOS E DA AMAZÔNIA LEGAL. Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai. PCBAP. Brasília, DF, 1997. 369p.

Pereira, A. A.; Barros, D. A.; Junior, F.W. A.; Pereira, J. A. A.; Reis, A. A. Análise da distribuição espacial de áreas queimadas através da função K de Ripley. **Scientia Forestalis**, v. 41. n. 100, p. 445-455, 2013.

SFB. Serviço Florestal Brasileiro. Disponível em: < <http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/os-biomas-e-suas-florestas>>. Acesso em: 21.out.2014.

Silva, T. B., Rocha, W. J. S. F., Angelo, M. F. Quantificação e análise espacial dos focos de calor no Parque Nacional da Chapada Diamantina - BA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2013. p. 6969-6976. Disponível na biblioteca digital URLib: < <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1493.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2014.

Silverman, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis**. London, England: Chapman and Hall. 1986. 175 p.

Soares, R. V.; Batista, A. C. **Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. Curitiba: Ronaldo Viana Soares e Antonio Carlos Batista, 2007. 264 p.

Yang, J., He, H. S., Shifley, S. R., Gustafson E. J. Spatial Patterns of Modern Period Human-Caused Fire Occurrence in the Missouri Ozark Highlands. **Forest Science**. 53(1): 1-15. 2006.