

ANÁLISE DE LACUNARIDADE DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE QUEIMADAS NA AMAZÔNIA LEGAL

Leandro Ricardo Rodrigues de LUCENA¹

Carlos Renato dos SANTOS²

Tatijana STOSIC²

Moacyr Cunha FILHO²

- RESUMO: Neste artigo avaliou-se a variabilidade espacial de queimadas detectadas na região da Amazônia Legal, durante o período 2000-2013, utilizando o método de lacunaridade. Os resultados mostraram que nos anos com maior número de queimadas, os valores de lacunaridade foram sempre menores (indicando um comportamento espacial mais homogêneo), enquanto nos anos com menores números de queimadas os valores de lacunaridade foram maiores (indicando um comportamento espacial mais heterogêneo). Este comportamento também é observado quando se compara a distribuição espacial de queimadas detectadas nas estações seca ou chuvosa.
- PALAVRAS-CHAVE: Lacunaridade; queimadas; Amazônia Legal.

1 Introdução

Os incêndios florestais e o uso do fogo em sistemas agrícolas afetam o equilíbrio dos ecossistemas, causando a perda de biodiversidade, degradação de propriedades do solo, destruição e alterações em cobertura vegetal (COLOMBAROLI *et al.*, 2013; INBAR *et al.*, 2014; BRET-HARTE *et al.*, 2013). Durante um incêndio também ocorre a emissão de carbono e gases estufa, contribuindo para o aquecimento global e alternâncias de mudanças climáticas (RANDERSON *et al.*, 2006; RAMANATHAN e CARMICHAEL, 2008). A emissão de aerossóis afeta a formação de nuvens resultando na diminuição da precipitação (ANDREAE *et al.*, 2004), e tem impacto negativo na saúde humana (SMITH *et al.*, 2014).

No Brasil, a maioria dos incêndios em vegetação (queimadas) ocorre como consequência da atividade humana (desmatamentos, limpeza de áreas designadas à agricultura, coleta manual de cana de açúcar, etc.). O maior número de queimadas é detectado nas regiões do Cerrado e na Amazônia, na região denominada de Arco do desmatamento (SCHROEDER *et al.*, 2005). Na região da Amazônia Legal detecta-se um

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Zootecnia, Av. Gregório Ferraz Nogueira, CEP: 56909-535, Serra Talhada, PE, Brasil. E-mail: leandroricardo_est@yahoo.com.br

² Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Departamento de Biometria e Estatística Aplicada, Rua Dom Manoel de Medeiros, CEP: 52171-900, Recife, PE, Brasil, E-mail: carlosrenato@estatistico.com.br; tastosic@gmail.com; moacyr2006@ibest.com.br

grande número de queimadas, chegando a concentrar mais de 85% de todas as queimadas do Brasil. No período de estação seca, nos meses de junho a outubro, o número de focos de calor aumenta consideravelmente. Os Estados que apresentam os maiores registros de queimadas são: Mato Grosso e Pará (IGNOTTI *et al.*, 2007). Os incêndios, em sua grande maioria, são consequências das atividades humanas, mas também ocorrem incêndios acidentais que podem se propagar pelas grandes áreas florestais, especialmente durante períodos de secas severas como as que ocorreram em 2005, 2007 e 2010 (ARAGÃO *et al.*, 2007; MARENGO *et al.*, 2011; BRANDO *et al.*, 2014).

Os incêndios florestais, junto com outros fatores naturais e socioeconômicos (mudanças climáticas, desenvolvimento agrário, construção de rodovias, política de preservação dos recursos naturais, etc.), vão afetar no futuro a degradação da floresta amazônica (MALHI *et al.*, 2009; MORTON *et al.*, 2008; BARBER *et al.*, 2014). Para melhorar a estimativa do risco, detecção e monitoramento dos incêndios em áreas remotas como Amazônia, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) vem desenvolvendo desde a década de 1980 um sistema operacional de detecção de queimadas, o mais completo do mundo.

Os dados (focos de calor ou *hot pixels*) são obtidos nas imagens termais dos vários satélites, e em seguida integrados a um sistema geográfico de informações e disponibilizados pela internet (INPE, 2015). As análises destas imagens mostram focos de calor (*hot pixels*) que possuem a intensidade infravermelha correspondente à temperatura da vegetação queimada. Todos os focos de calor não necessariamente representam os incêndios, detecções falsas podem se originar de outros fenômenos, a exemplo de: reflexão de um lago, ou emissões industriais. Também pode ocorrer de alguns focos de queimadas não serem detectados em virtude da cobertura de nuvens ou coincidência com passagem do satélite, por exemplo. O Brasil não possui um banco de dados histórico de incêndios (localização espacial, data e hora de início, e área queimada) como existe em alguns países como: Estados Unidos da América, Canadá, Espanha e Itália. Por outro lado, os focos de calor obtidos das imagens termais dos satélites e processados pelo INPE representam um bom *Proxy* para incêndios de vegetação, e já foram utilizados em vários estudos de variabilidade temporal e espacial de incêndios no Brasil, e também sua relação com fatores climáticos e antrópicos (ARAGÃO *et al.*, 2008; ARAGÃO *et al.*, 2007; BENICIO *et al.*, 2013).

A iniciação, propagação e supressão de incêndios dependem de vários fatores como: cobertura vegetal, condições climáticas, topografia e métodos de proteção de fogo, formando um sistema dinâmico, extremamente complexo, dificultando a análise e modelagem. Por outro lado, o conhecimento deste fenômeno é crucial para entender outros que estão relacionados e estabelecer novos métodos que sejam mais eficientes para o manejo de recursos ambientais, uso de solo e agricultura (BOWMAN *et al.*, 2009).

Recentemente, as metodologias de física estatística e análise dos sistemas complexos, como a geometria fractal (TELESCA *et al.*, 2007; FLETCHER *et al.*, 2014), multifractal (BENICIO *et al.*, 2013) e criticalidade auto organizada (MALAMUD *et al.*, 2005; TEBBENS *et al.*, 2005), mostraram-se promissoras nos estudos da variabilidade espacial e temporal dos focos de queimadas.

Um fractal é um objeto que apresenta invariância na sua forma, ou seja, à medida que a escala, sob a qual o mesmo é analisado, é alterada, ele mantém sua estrutura idêntica à original. Logo, os fractais determinísticos são formas geométricas cuja dimensão, não

inteira, apresenta auto semelhança. Na natureza encontram-se os fractais estocásticos caracterizados pela auto semelhança estatística (MANDELBROT, 1982).

A dimensão fractal pode ser calculada utilizando vários métodos, e em geral é suficiente para caracterização de um objeto com geometria fractal (THEILLER, 1990). Em alguns casos, os objetos fractais com mesma dimensão fractal podem mostrar diferença em sua distribuição espacial, tornando-se necessário a utilização de outros métodos de quantificação, sendo a lacunaridade o mais promissor (ALLAIN e CLOITRE, 1991).

A lacunaridade é uma medida que descreve a distribuição de tamanhos de lacunas de um objeto fractal (MANDELBROT, 1982). Objetos fractais que apresentam grandes valores de lacunaridade são objetos heterogêneos e não possui invariância translacional, enquanto que os objetos fractais com lacunaridades menores são homogêneos e possui invariância translacional (maior uniformidade de sua distribuição espacial) (GEFEN, 1983).

Objetiva-se neste trabalho, avaliar a distribuição espacial de focos de queimadas detectados na região da Amazônia Legal durante o período 2000-2013, utilizando como ferramenta de avaliação à análise de lacunaridade bidimensional.

2 Material e métodos

2.1 Área de estudo

A região do arco do desflorestamento situada na Amazônia Legal é composta por 524 municípios que se distribuem desde o sudeste do Maranhão, incluindo o norte do Tocantins, o sul do Pará, norte do Mato Grosso, Rondônia, sul do Amazonas, até o sudeste do Acre (IGNOTTI *et al.*, 2007), conforme pode ser visto na Figura 1.



Figura 1 - Área de estudo.

2.2 Dados

No Brasil, o monitoramento de queimadas via sensoriamento remoto, iniciou em Julho de 1987 com a implementação do projeto SEQE - Sensoriamento Remoto de Queimadas por Satélite, após vários acordos entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), ver (GONÇALVES *et al.*, 2012).

Os dados estudados neste artigo foram obtidos justamente através do site do INPE (www.inpe.br), considerando sempre o satélite referência indicado no referido site: no período de 2000 a 09/08/2007 o satélite NOAA-12 e a partir de então até 2013 o AQUA_M-T. Neste trabalho foram utilizadas as informações sobre tempo de detecção e localização espacial (longitude e latitude) de focos de calor na Amazônia Legal.

A Figura 2 apresenta 10245 focos de calor, detectados em setembro de 2012 no estado de Amazonas (<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas>).

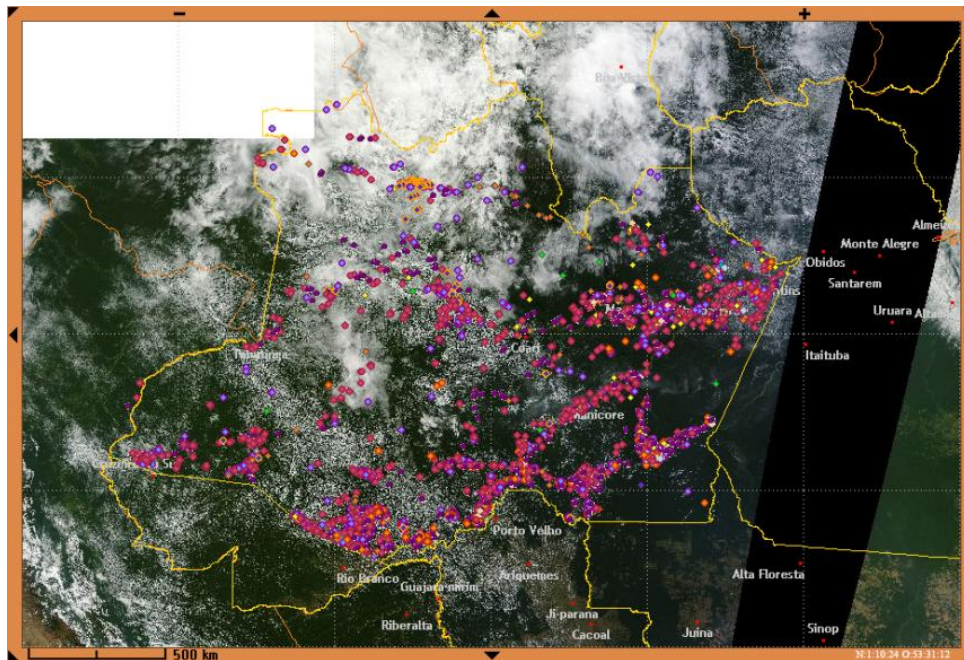


Figura 2 – Focos de calor detectados em setembro de 2012 no estado da Amazonas.

2.3 Lacunaridade

O método de lacunaridade foi originalmente desenvolvido para detecção de padrões de texturas de objetos fractais, mas pode ser generalizado para qualquer padrão espacial, incluindo aqueles com propriedades fractais e multifractais, podendo ser usado, tanto com dados quantitativos, quanto para dados binários e também em dimensões 1D, 2D e 3D (PLOTINICK, 1996).

A lacunaridade foi amplamente utilizada em estudos de fenômenos ecológicos (PLOTINICK *et al.*, 1993; MALHI e ROMÁN-CUESTA, 2008), na geologia (ROY *et al.*, 2010), planejamento urbano (MYINT e LAM, 2005), na medicina (GOULD *et al.*, 2011) e na climatologia (MARTINEZ *et al.*, 2007; MARTINEZ *et al.*, 2010; LUCENA *et al.*, 2016; LUCENA, 2015; LUCENA *et al.*, 2015; LUCENA *et al.*, 2014).

Para calcular a lacunaridade aplica-se o método de *gliding box* (ALLAIN e CLOITRE, 1991). Para dados bidimensionais este método é descrito pelos seguintes passos:

i - Uma caixa de tamanho $r \times r$ é colocada na origem de uma matriz de informação $L \times C$ (longitude e latitude das queimadas) e sua massa representando o número “s” de sítios ocupados (número de queimadas detectadas) é contado.

ii - A caixa é movida ao longo de todo o conjunto de observações e sua massa é calculada.

iii - Este processo é repetido para todo o conjunto de observações, obtendo a distribuição de frequência da massa da caixa $n(s, r)$, e correspondentemente a distribuição de probabilidade $P(s, r) = n(s, r)/N(r)$ em que, $N(r) = (L - r + 1)(C - r + 1)$ é o número total de caixas de tamanho $r \times r$ deslizadas na matriz de informação.

iv - A lacunaridade para o tamanho de caixa $r \times r$ é definida por:

$$L(r) = M_2 / M_1^2$$

em que, $M_1 = \sum_{s=0}^{r^2} s P(s, r)$ e $M_2 = \sum_{s=0}^{r^2} s^2 P(s, r)$ são o primeiro e o segundo momento da distribuição de $P(s, r)$, respectivamente.

v - A lacunaridade diminui com tamanho de caixa e segue uma lei de potência:

$$L(r) = \alpha r^{-\beta}$$

O expoente β pode ser calculado como o negativo do coeficiente angular da reta $\log L(r)$ versus $\log r$.

Para exemplificar tal procedimento observa-se na Figura 3 um mapa aleatório de dimensão 12×12 representando um determinado fenômeno onde o valor 0 corresponde a não ocupação do fenômeno e o valor 1 a presença do fenômeno.

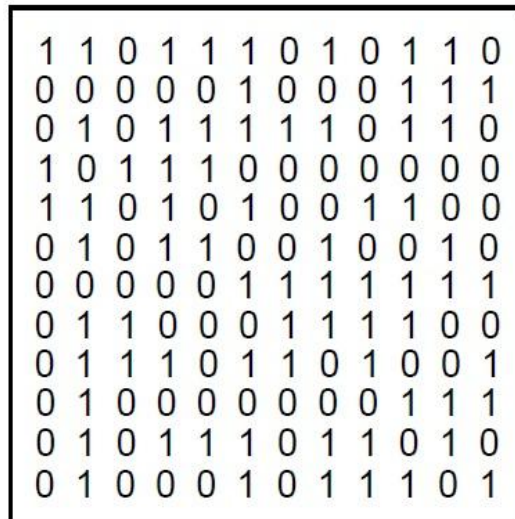


Figura 3 - Mapa aleatório 12×12 , com 1's representando a ocupação da célula.

Na Tabela 1, observa-se o número de caixas de tamanho 2×2 com nenhum sítio ocupado, um, dois, três e os quatros sítios ocupados, posteriormente suas respectivas probabilidades de ocorrência de 0, 1, 2, 3 e 4 sítios ocupados e o cálculo do primeiro e segundo momento, encontrado assim um valor de lacunaridade de $L(2) = 1,216$.

Tabela 1 - Cálculo da lacunaridade para caixa de tamanho 2 do mapa aleatório apresentado na Figura 3

s	$n(s, r)$	$P(s, r)$	$s \times P(s, r)$	$s^2 \times P(s, r)$
0	3	0,025	0	0
1	35	0,289	0,289	0,289
2	46	0,380	0,760	1,520
3	29	0,240	0,720	2,160
4	8	0,066	0,264	1,056
			$M_1=2,033$	$M_2=5,025$

3 Resultados e discussão

A estatística descritiva referente aos dados de queimadas detectadas para cada ano está apresentada na Tabela 2. Verifica-se que no período de 2002-2006, a média diária do número de queimadas foi maior em comparação ao período de 2007-2011, conforme pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Medidas descritivas dos focos diários de queimadas na Amazônia Legal em relação aos anos avaliados

Estações	Min	1º quartil	Média	Mediana	3º quartil	Max.	Desvio Padrão
2000	0,0	2,3	94,7	24,0	92,0	1151,0	180,6
2001	0,0	4,0	129,0	32,0	149,0	1381,0	208,8
2002	0,0	11,0	231,8	67,0	291,0	2416,0	384,9
2003	0,0	21,0	203,2	88,0	255,0	2017,0	284,2
2004	0,0	13,0	272,1	71,5	350,0	2914,0	445,7
2005	0,0	7,0	261,8	44,0	247,0	3279,0	488,8
2006	0,0	5,0	142,7	25,0	116,0	2309,0	297,2
2007	0,0	0,0	78,2	4,0	34,0	1415,0	222,3
2008	0,0	2,3	95,2	17,0	95,0	1209,0	177,7
2009	0,0	0,0	49,1	8,0	45,0	478,0	92,5
2010	0,0	0,0	94,5	5,0	38,0	2619,0	263,4
2011	0,0	0,0	76,3	13,0	84,0	1001,0	140,8
2012	0,0	11,0	144,9	33,5	161,8	1738,0	245,8
2013	0,0	9,0	97,9	33,0	100,0	1120,0	162,9

A Tabela 3 e Figura 4 apresentam os valores de lacunaridade da distribuição espacial de queimadas (conjunto de dados de longitude e latitude das localizações de detecção dos focos de calor, providenciado pelo INPE) para cada ano durante o período estudado. Observa-se que para todos os anos o valor de lacunaridade diminui com o aumento do tamanho de caixa, indicando menor heterogeneidade na distribuição espacial das queimadas nas escalas maiores.

Tabela 3 - Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas para cada ano no período 2000 a 2013

Anos	Tamanho de caixa (r)								β
	2	4	8	16	32	64	128	256	
2000	113,13	56,42	31,50	20,01	15,31	11,51	8,21	5,71	0,58
2001	86,54	44,64	26,67	18,96	14,54	10,99	7,72	5,16	0,54
2002	58,08	34,80	23,56	17,43	13,39	10,26	7,25	4,88	0,48
2003	66,96	39,41	26,06	18,99	14,52	11,03	7,03	5,27	0,50
2004	53,38	33,20	23,24	17,63	13,94	10,99	8,14	5,71	0,43
2005	52,48	31,72	21,55	16,09	12,43	9,42	6,53	4,22	0,49
2006	85,69	46,31	28,00	19,12	13,87	9,97	6,62	4,26	0,59
2007	157,76	87,65	53,34	35,26	24,01	15,95	9,09	5,46	0,67
2008	112,31	56,19	32,51	21,24	14,86	10,63	7,11	4,47	0,63
2009	197,02	87,75	45,39	28,13	19,53	13,52	8,31	5,19	0,71
2010	131,11	74,25	47,75	34,43	25,90	19,24	12,88	6,71	0,56
2011	124,21	55,47	28,20	16,30	10,31	6,82	4,59	3,18	0,74
2012	79,61	41,40	24,30	15,64	10,54	7,08	4,68	3,16	0,65
2013	97,83	43,12	22,20	13,59	9,23	6,44	4,38	3,00	0,69

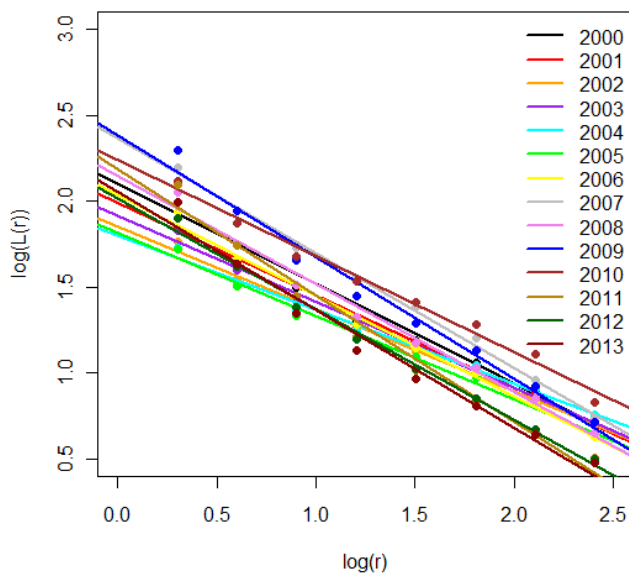


Figura 4 - Lacunaridade $L(r)$ em função de tamanho de caixa r para cada ano do período 2000-2013.

Verifica-se ainda, que no período 2001-2006 o valor da lacunaridade foi menor (com menor expoente β), indicando uma distribuição espacial mais homogênea, enquanto que os maiores valores de lacunaridade (com maior expoente β) no período 2007-2011,

indicam que as queimadas foram mais concentradas espacialmente, com ampla distribuição de tamanhos de lacunas, Tabela 3.

O menor valor de lacunaridade para todas as escalas estudadas foi para o ano 2005, indicando que as queimadas foram distribuídas espacialmente com um padrão mais homogêneo, como consequência da seca que afetou os Estados de Rondônia, Acre e Amazonas (MARENGO *et al.*, 2008). Durante os períodos de seca, aumenta a quantidade de material combustível (grama, folhas e galhos secos) resultando em maior número de incêndios acidentais que se propagam pelas grandes áreas de vegetação.

Através da análise de agrupamento pelo método de Ward (utilizando os valores de lacunaridade), pode-se verificar a formação de quatro grupos: um grupo formado pelos anos de 2007, 2009 e 2010 (maiores valores de lacunaridade independente do tamanho de janela e menor número de queimadas detectadas, Tabela 2 e 3), um segundo grupo formado pelos anos 2002 a 2005 (menores valores de lacunaridade independente do tamanho de janela e maior número de queimadas detectadas, Tabela 2 e 3), o terceiro grupo com os anos 2000, 2008 e 2011 e o quarto grupo pelos anos de 2001, 2006, 2012 e 2013, Figura 5. Os últimos dois grupos caracterizam-se com valores da lacunaridade e número de queimadas intermediário, preservando a relação maior número de queimadas menor lacunaridade, como pode ser observado nas Tabelas 2 e 3.

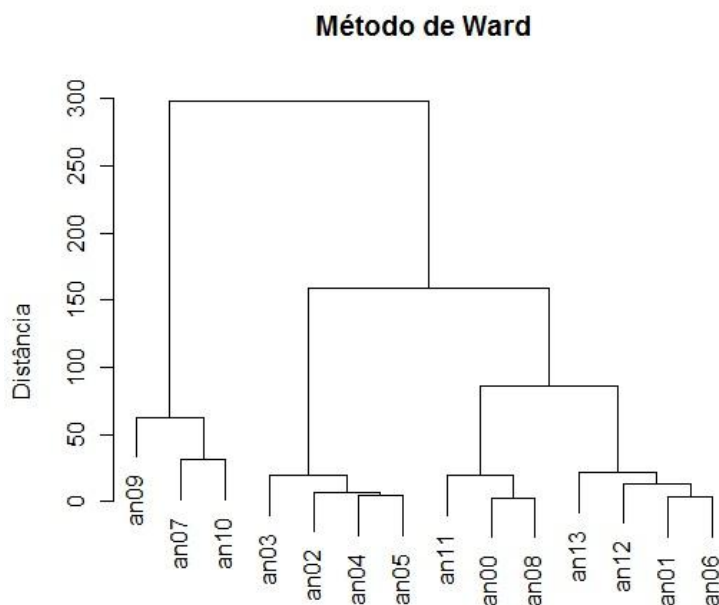


Figura 5 - Dendrograma expondo a hierarquia dos agrupamentos formados após a aplicação do método de Ward nos valores de lacunaridade para todos os anos estudados.

Comparando as estações chuvosas e seca observa-se que os valores de lacunaridade foram maiores na estação chuvosa (menos queimadas detectadas e agrupadas espacialmente) do que em relação ao período de seca, quando o número de queimadas foi maior e distribuído mais uniformemente, conforme pode ser visto nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas na estação chuvosa nos anos de 2000 a 2013

Anos	Tamanho de caixa (r)								β
	2	4	8	16	32	64	128	256	
2000	887,72	469,28	256,06	158,90	108,49	76,14	46,81	22,94	0,71
2001	539,85	200,36	164,99	116,39	89,65	66,59	41,88	20,60	0,58
2002	486,79	271,94	165,35	110,69	78,09	56,40	36,97	19,42	0,62
2003	371,22	215,65	140,05	99,03	68,17	50,46	31,23	16,42	0,60
2004	382,43	227,74	147,32	99,59	73,33	56,50	38,38	21,11	0,56
2005	742,70	333,08	154,37	78,13	46,39	31,99	21,66	13,04	0,81
2006	1399,13	635,11	286,19	130,84	67,25	39,57	24,13	13,96	0,95
2007	806,84	391,63	210,13	131,51	94,52	64,98	37,20	18,71	0,72
2008	1671,38	614,63	237,28	100,64	50,14	28,95	17,40	10,32	1,04
2009	2328,04	965,56	406,73	169,97	79,54	42,86	25,36	15,05	1,05
2010	1636,97	651,83	265,91	112,78	51,94	30,37	17,95	10,78	1,04
2011	3511,63	1440,47	573,94	228,47	92,52	46,65	26,99	15,97	1,13
2012	952,85	356,80	136,65	60,52	35,07	24,72	17,75	12,15	0,88
2013	886,76	308,97	112,44	50,32	30,23	21,95	16,04	10,55	0,88

Tabela 5 - Valores de lacunaridade para diferentes tamanhos de caixas na estação seca nos anos de 2000 a 2013

Anos	Tamanho de caixa (r)								β
	2	4	8	16	32	64	128	256	
2000	126,53	60,37	32,02	20,21	14,44	10,62	7,44	5,07	0,63
2001	99,84	49,42	27,91	18,79	13,86	10,13	6,94	4,62	0,60
2002	63,24	36,96	24,41	17,73	13,41	10,11	6,95	4,56	0,51
2003	76,85	43,24	27,13	18,94	14,15	10,66	7,56	5,12	0,53
2004	57,89	34,54	23,18	17,05	13,15	10,12	7,36	5,13	0,47
2005	55,31	33,38	22,65	16,88	13,01	9,80	6,73	4,26	0,49
2006	90,05	48,53	29,29	20,02	14,51	10,38	6,84	4,34	0,59
2007	191,45	106,94	65,07	42,65	28,43	18,54	11,50	6,10	0,68
2008	119,02	59,65	34,50	22,53	15,74	11,26	7,50	4,65	0,63
2009	212,67	93,48	47,81	29,75	20,80	14,40	8,71	5,32	0,71
2010	140,48	79,87	51,50	37,24	28,02	20,75	13,80	6,97	0,56
2011	128,06	56,90	28,84	16,66	10,49	6,89	4,58	3,13	0,74
2012	84,99	44,38	26,10	16,73	11,17	7,38	4,79	3,16	0,66
2013	107,08	47,27	24,35	14,81	9,93	6,81	4,52	3,02	0,70

Através da análise de agrupamento do método de Ward (utilizando os valores da lacunaridade e expoente β) verifica-se de fato a existência de dois grupos, um grupo formado por todos os períodos secos e outro grupo de todos os períodos chuvosos, Figura

6, indicando que além do número de queimadas detectadas, as estações secas e chuvosas também mostram a diferença na distribuição espacial das mesmas: menos queimadas e concentradas espacialmente com ampla distribuição de tamanhos de lacunas na estação chuvosa e mais queimadas distribuídas mais uniformemente na estação seca.

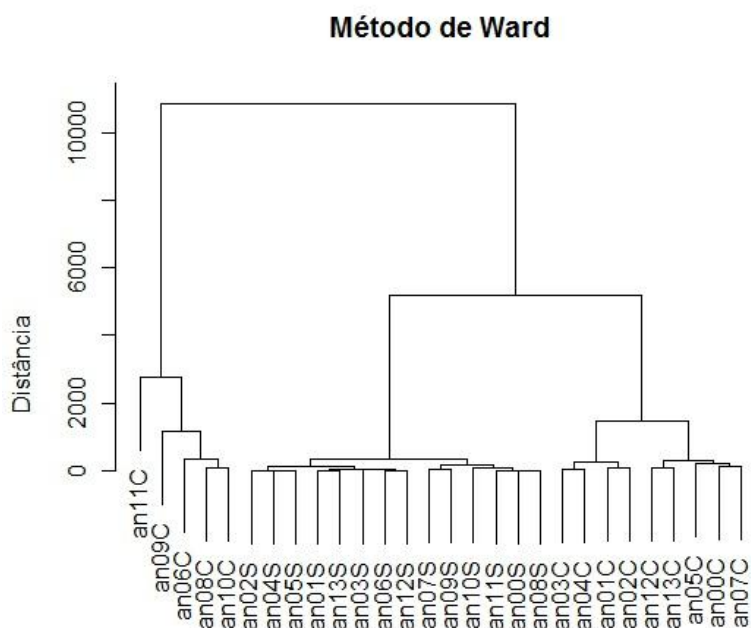


Figura 6 - Dendrograma expondo a hierarquia dos agrupamentos formados após a aplicação do método de Ward nos valores de lacunaridade para estações secas e chuvosas dos anos estudados.

Conclusões

Neste artigo utilizou-se o método a análise de lacunaridade para representar a distribuição espacial de focos de calor detectadas na Amazônia Legal durante o período 2000-2013. Nos anos com maior número de queimadas os valores de lacunaridade foram menores (indicando um comportamento espacial mais homogêneo), enquanto nos anos com menor número de queimadas os valores de lacunaridade foram maiores (indicando um comportamento espacial mais heterogêneo). Os resultados do agrupamento mostram que o método de lacunaridade pode ser útil na representação da distribuição espacial das queimadas nas estações seca e chuvosa, e assim pode contribuir ao planejamento das atividades agrícolas e ao desenvolvimento de estratégias para diminuir as consequências de fenômenos climáticos extremos, como secas severas.

LUCENA, L. R. R., SANTOS, C. R., STOSIC, T., FILHO, M. C. Lacunarity analysis of spatial distribution of forest fires in Legal Amazon. *Rev. Bras. Biom.* Lavras, v.35, n.2, p.283-297, 2017.

- **ABSTRACT:** *In this work we analyze spatial variability of forest fires detected in the Legal Amazon region during the period 2000-2013, using the lacunarity method. The results show that for years with higher number of forest fires, the values of lacunarity were lower (indicating more homogeneous behavior), while for years with lower number of forest fires, the values of lacunarity were higher (indicating more heterogeneous behavior). The different properties of spatial distribution of forest fires are also observed for rainy and dry season*
- **KEYWORDS:** *Lacunarity; hot-pixels; Legal Amazon*

Referências

ALLAIN, C.; CLOITRE, M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. *Physical Review A*, v.44, p.3552-3558, 1991.

ANDREAE, M. O.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A. A.; FRANK, G. P.; LONGO, K. M.; SILVA-DIAS, M. A. F. Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science*, v.303, p.1337-1342, 2004.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazon. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v.363, p.1779-1785, 2008.

ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters*, v.34, p.L07701, 2007.

BARBER, C. P.; COCHRANE, M. A.; SOUZA Jr., C. M.; LAURANCE, W. F. Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. *Biological Conservation*, v. 177, p. 203-209, 2014.

BENICIO, R. B.; STOSIC, T.; FIGUEIREDO, P. H.; STOSIC, B. D. Multifractal behavior of wild-land and forest fire time series in Brazil. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v.392, n.24, p. 6367-6374, 2013.

BOWMAN, D. M.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON J. M.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, C. A.; MARSTON, J. B.; MORITZ, M. A.; PRENTICE, I. C.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SWETNAM, T. W.; VAN DER WERF, G. R.; PYNE, S. J. Fire in the Earth system. *Science*, v.324, p.481-484, 2009.

BRANDO, P. M.; BALCH, J. K.; NEPSTAD, D. C.; MORTON, D. C.; PUTZ, F. E.; COE, M. T.; SILVERIO, D.; MACEDO, M. N.; DAVIDSON, E. A.; NOBREGA, C. C.; ALENCAR, A.; SOARES-FILHO, B. S. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v.111, p.6347-6352, 2014.

- BRET-HARTE, M. S.; MACK, M. C.; SHAVER, G. R.; HUEBNER, D. C.; JOHNSTON, M.; MOJICA, C. A.; PIZANO, C.; REISKIND, J. A. The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, v.368, p.20120490, 2013.
- COLOMBAROLI, D.; BECKMANN, M.; KNAAP, W. O.; CURDY, P.; TINNER, W. Changes in biodiversity and vegetation composition in the central Swiss Alps during the transition from pristine forest to first farming. *Diversity and Distributions*, v.19, p.157-170, 2013.
- FLETCHER, I. N.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; FRIEDLINGSTEIN, P. Fractal properties of forest fires in Amazonia as a basis for modelling pan-tropical burnt area. *Biogeosciences*, v.11, p.1449-1459, 2014.
- GEFEN, Y.; MEIR, Y.; AHARONY, A. Geometric implementation of hypercubic lattice with non-integer dimensionality by use of low lacunarity fractal lattices. *Physical Review Letters*, v.50, p.145-188, 1983.
- GONÇALVES, K. S.; CASTRO, H. A.; HACON, S. S. As queimadas na região amazônica e o adoecimento respiratório. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, p. 1523-1532, 2012.
- GOULD, D. J.; VADAKKAN, T. J.; POCHÉ, R. A.; DICKINSON, M. E. Multifractal and lacunarity analysis of microvascular morphology and remodeling. *Microcirculation*, v.18, p. 136-151, 2011.
- IGNOTTI, E.; HACON, S. S.; SILVA, A. M. C.; JUNGER, W. L.; CASTRO, H. Efeitos das queimadas na Amazônia: método de seleção dos municípios segundo indicadores de saúde. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, v.10, p.453-464, 2007.
- INBAR, A.; LADO, M.; STERNBERG, M.; TENAU, H.; BEN-HUR, M. Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region. *Geoderma*, v.221, p.131-138, 2014.
- INPE (2015). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Projeto Queimadas. Endereço eletrônico: www.cptec.inpe.br/queimadas. Acesso fevereiro 2015
- LUCENA, L. R. R.; STOSIC, T.; CUNHA FILHO, M.; SANTOS, C. R. Análise de lacunaridade de fenômenos climáticos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Biometria*, v.34, p.334-346, 2016.
- LUCENA, L. R. R.; STOSIC, T.; CUNHA FILHO, M. Avaliação da precipitação diária do estado de Sergipe utilizando análise de lacunaridade. *Revista Brasileira de Biometria*, v.33, p.268-276, 2015.
- LUCENA, L. R. R. Lacunaridade como índice de avaliação da precipitação do sertão do Pajeú. *Biomatemática*, v.25, p.1-12, 2015.
- LUCENA, L. R. R.; STOSIC, T.; CUNHA FILHO, M. Análise de lacunaridade de série temporal da vazão dos rios Atibaia e Jaguari. *Revista Brasileira de Biometria*, v.32, p.609-617, 2014.

- MALAMUD, B. D.; MILLINGTON, J. D.; PERRY, G. L. Characterizing wildfire regimes in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v.102, p.4694-4699, 2005.
- MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; GALBRAITH, D.; HUNTINGFORD, C.; FISHER, R.; ZELAZOWSKI, P.; SITCH, S.; MCSWEENEY, C.; MEIR, P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.106, p.20610-20615, 2009.
- MALHI, Y.; ROMÁN-CUESTA, R. M. Analysis of lacunarity and scales of spatial in homogeneity of IKONOS images of Amazonian tropical forest canopies. *Remote Sensing of Environment*, v.112, p.2074-2087, 2008.
- MANDELBROT, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, New York, 1982.
- MARENCO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, v. 38, p. L12703, 2011.
- MARENCO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, I. F. The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, v.21, p.495-516, 2008.
- MARTINEZ, M. D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Predictability of the monthly North Atlantic Oscillation index based on fractal analysis and dynamics system theory. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v.17, p.93-101, 2010.
- MARTINEZ, M. D.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Lacunarity, predictability and predictive instability of the daily pluviometric regime in the Iberian Peninsula. *Nonlinear Processes in Geophysics*, v.14, p.109-121, 2007.
- MORTON, D. C.; DEFRIES, R. S.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; SCHROEDER, W.; VAN DER WERF, G. R. Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia. *Global Change Biology*, v. 14, p. 2262-2275, 2008.
- MYINT, S. W.; LAM, N. A study of lacunarity-based texture analysis approaches to improve urban image classification. *Computers, Environment and Urban Systems*, v.29, p.501-523, 2005.
- PLOTNICK, R. E.; GARDNER, R. H.; HARGROVE, W. W.; PRESTERGAARD, K.; PERMUTTER, M. Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns. *Physical Review E*, v.53, p.5461-5468, 1996.
- PLOTNICK, R. E.; GARDNER, R. H.; O'NEILL, R. V. Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology*, v.8, p.201-211, 1993.
- RAMANATHAN, V.; CARMICHAEL, G. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, v.1, p.221-227, 2008.
- RANDERSON, J. T.; LIU, H.; FLANNER, M. G.; CHAMBERS, S. D.; JIN, Y.; HESS, P. G.; PFISTER, G.; MACK, M. C.; TRESEDER, K. K.; WELP, L. R.; CHAPIN, F. S.; HARDEN, J. W.; GOULDEN, M. L.; LYONS, E.; NEFF, J. C.; SCHUUR, E. A. G.; ZENDER, C. S. The impact of boreal forest fire on climate warming. *Science*, v.17, p.1130-1132, 2006.

ROY, A.; PERFECT, E.; DUNNE, W. M.; ODLING, N.; KIM, J. W. Lacunarity analysis of fracture network: Evidence of scale depended clustering. *Journal of Structural Geology*, v.32, p.1444-1449, 2010.

SCHROEDER, W.; MORISETTE, J. T.; CSISZAR, I.; GIGLIO, L.; MORTON, D.; JUSTICE, C. O. Characterizing vegetation fire dynamics in Brazil through multisatellite data: Common trends and practical issues. *Earth Interactions*, v. 9, p.1-26, 2005.

SMITH, L. T.; ARAGÃO, L. E. O. C.; SABEL, C. E.; NAKAYA, T. Drought impacts on children's respiratory health in the Brazilian Amazon. *Scientific Reports*, v. 4, p.3726, 2014.

TEBBENS, S. F.; BURROUGHS, S. M. Forest fire burn areas in Western Canada modeled as self-similar criticality. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, v. 211, n.3-4, p. 221-234, 2005.

TELESCA, L.; AMATUCCI, G.; LASAPONARA, R.; LOVALLO, M.; RODRIGUES, M. J. Space-time fractal properties of the forest-fire series in central Italy. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, v.12, n.7, p.1326-1333, 2007.

THEILLER, J. Estimating fractal dimension. *Journal Optical Society America*, v.1, n.6, p.1055-1073, 1990.

Recebido em 21.03.2016

Aprovado após revisão em 27.07.2016