

Modelagem da dinâmica de incêndios florestais em Rio Branco-AC: uma abordagem baseada em autômato celular acoplado a sistema fuzzy

Isaac D. B. Silva¹

Laécio C. de Barros² João F. C. A. Meyer³

Depto Matemática Aplicada, IMECC - Unicamp, 13083-970, Campinas/SP.

Resumo. Esse trabalho trata da dinâmica de propagação de incêndio a partir de autômatos celulares. Para sua modelagem, foi utilizada a metodologia de autômatos em que a mudança de estado é feita com auxílio de probabilidades. As simulações são feitas de duas formas: primeiro supondo que as probabilidades são constantes. Em seguida, para representar a probabilidade não constante, um sistema baseado em regras fuzzy foi acoplado ao autômato. As entradas do sistema fuzzy são umidade do ar e precipitação diária e a saída, entendida como risco de incêndio, desempenha o papel da probabilidade e será utilizada no autômato. As simulações são efetuadas com os dados de umidade relativa do ar e precipitação diária registradas para o município de Rio Branco-Ac, no ano de 2005. As séries temporais das porcentagens de nós no estado “queimando” geradas pelos autômatos com probabilidades constantes, foram comparadas com aquelas geradas pelo automato fuzzy, bem como com os percentuais de focos de calor ocorridos diariamente no mesmo ano e local.

Palavras-chave: *Incêndios florestais; sistema fuzzy; autômato celular.*

1. Introdução

No estado do Acre, no ano de 2005, ocorreram incêndios que destruíram ou danificaram dezenas de milhares de hectares de florestas. Utilizando imagens

¹isaacdbs@yahoo.com.br

²laeciocb@ime.unicamp.br

³joni@ime.unicamp.br

de satélite obtidas estimou-se que, neste ano, foram queimados mais de 200.000 hectares de áreas abertas (pastos e áreas agrícolas) no leste do Acre. O resultado dessas queimadas geraram prejuízos na ordem de mais de cem milhões de reais, de acordo com a Defesa Civil do estado (Brown e Vasconcelos, 2006). Por esse motivo, este trabalho está sendo realizado com as informações climáticas e número de focos de calor da cidade de Rio Branco - AC nesse período.

Os fatores climáticos considerados no modelo são a umidade relativa do ar e a precipitação. Existe a constante troca de umidade entre a atmosfera e o material combustível e, se este último for suficientemente úmido, inviabiliza a ocorrência e propagação do fogo. A precipitação é importante pelo fato de manter o material florestal úmido, o que dificulta ou torna impossível o início e propagação do fogo. Existe uma forte correlação entre incêndios e prolongados períodos de seca, pois nesses períodos o material combustível cede umidade ao ambiente, tornando as condições favoráveis à ocorrência de incêndios (Nunes et al., 2008).

Para a detecção de queimadas, riscos de fogo e previsão de chuvas, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) utiliza diferentes satélites (sensores) para produzir diariamente alguns dados essenciais. Estes sensores se baseiam em emissões de radiação termal. Como nem sempre as fontes de alta emissão desta radiação são queimadas, denominou-se essas fontes de focos de calor (Pantoja e Brown, 2007; Vasconcelos et al., 2009). Os dados de focos de calor utilizados nesse trabalho foram obtidos do banco de dados de queimadas do INPE do ano de 2005, de todos os satélites disponíveis e referentes ao município de Rio Branco capital do estado do Acre (INPE, 2011).

Para simular a dinâmica dos incêndios, nos valem de autômatos celulares. Foi utilizada a metodologia de autômatos em que a mudança de estado é feita com auxílio de probabilidades. As simulações são feitas de duas formas: a primeira supondo que as probabilidades são constantes. Depois, foi acoplado ao autômato um sistema fuzzy cujas entradas são umidade do ar e precipitação diária e a saída, entendida como risco de incêndio fuzzy, será utilizada no autômato de maneira semelhante à utilização da probabilidade (que serve para decidir a mudança de estado do automato). Esse autômato acoplado a sistema fuzzy será denominado de autômato fuzzy e os que não possuem acoplamento serão os autômatos com probabilidade constante. Os autômatos celulares são amplamente utilizados em propagação de incêndios

(Louzada e Ferreira Jr., 2008; Almeida et al., 2008). Nessas duas referências a probabilidade de ignição permanece constante ao longo do tempo de simulação, apenas variando o cenário proposto. Em Santos (2007), pode-se notar o exemplo de uma probabilidade variável, mas que utiliza o modelo logístico baseado na velocidade e direção do vento.

O foco principal desse trabalho reside em sintetizar o autômato fuzzy para que a série temporal do percentual de nós no estado “queimando” desse autômato possa se aproximar do comportamento temporal da ocorrência de focos de calor.

2. Objetivos

A ideia principal desse trabalho reside no fato que a propagação dos incêndios reais é maior nos momentos em que a umidade está mais baixa e não ocorre precipitação em longos períodos. Como o risco de incêndio é uma variável já utilizada na literatura (Soares e Batista, 2007; Nunes et al., 2007) para sintetizar essas duas variáveis e, de alguma forma, “predizer” a possibilidade maior ou menor de ocorrência desse fenômeno, resolveu-se utilizá-lo nesse trabalho. Portanto, definimos como objetivos deste trabalho:

- Simular o risco de incêndio através de um sistema fuzzy;
- Criar um autômato celular fuzzy para operar com probabilidade limiar de propagação variável no tempo a partir do risco de incêndios fuzzy.

3. Metodologia

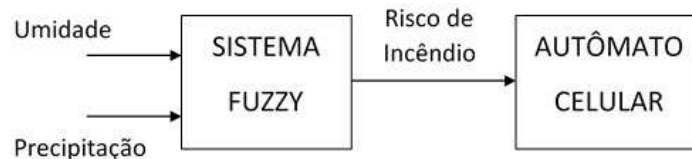


Figura 1: Diagrama em blocos do acoplamento entre sistema fuzzy e autômato.

Para a estimativa do risco de incêndio no tempo t , utilizou-se a saída de um sistema fuzzy, elaborado por Silva e Pontes Jr. (2011), que possui como

variáveis de entrada a umidade relativa do ar e precipitação total diária enquanto a saída é o risco de incêndio fuzzy, que será normalizado e utilizado como entrada para o autômato celular fuzzy, na Figura 1. As funções de pertinência, para cada conjunto fuzzy da base de regras, foram retiradas de (Silva e Pontes Jr., 2011) e são mostradas nas Figuras 2 e 3. Os valores do suporte dos números fuzzy para todas as variáveis linguísticas do sistema fuzzy foram ajustados a partir do dados de umidade, precipitação e focos de calor da cidade de Rio Branco no ano de 2005.

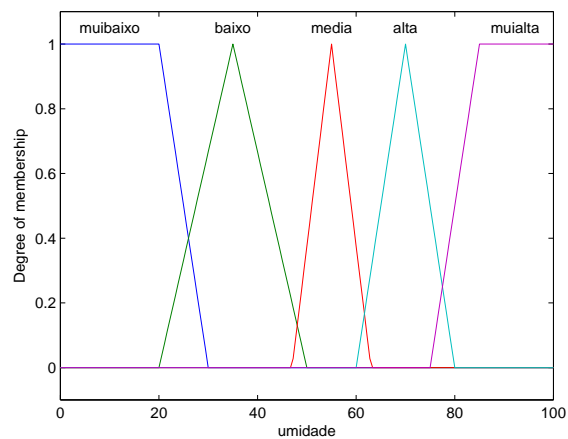


Figura 2: Variável linguística: umidade relativa do ar (%).

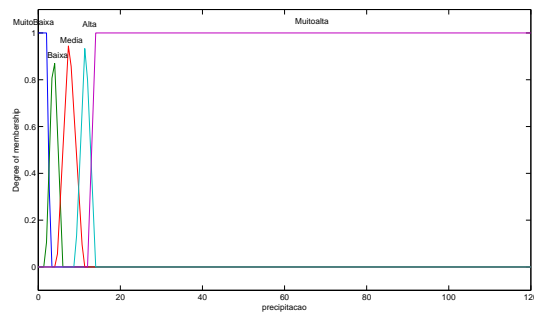


Figura 3: Variável linguística: precipitação diária em mm.

O método de inferência utilizado foi o de Mandani, e o centro de gravidade foi escolhido como técnica de defuzzificação. Quatro das bases de regras do controlador fuzzy de um total de 25, que foram elaboradas por um especialista, estão descritas abaixo:

1. SE (umidade é muito baixa) E (precipitação é muito baixa) ENTÃO variação do fator risco (VRF) é alta positiva.
2. SE (umidade é baixa) E (precipitação é média) ENTÃO variação do fator risco (VRF) é média positiva.
3. SE (umidade é baixa) E (precipitação é muito alta) ENTÃO variação do fator risco (VRF) é média negativa.
4. SE (umidade é alta) E (precipitação é muito alta) ENTÃO variação do fator risco (VRF) é alta negativa.

O risco de incêndio fuzzy foi obtido através do sistema dinâmico fuzzy definido pela Equação 3.1.

$$\begin{cases} R_{k+1} = R_k + \Delta(R_k) \\ R_0 \in \mathbb{R}^n \text{ dado} \end{cases} \quad (3.1)$$

com $\Delta(R_k) \in \mathbb{R}$ obtido por um sistema baseado em regras fuzzy.

Para acoplar o sistema dinâmico fuzzy ao autômato, efetuou-se a normalização dos valores de risco pelo valor máximo do risco obtido. Esse processo tem a finalidade de que o risco assuma o papel de probabilidade limiar de propagação. O gráfico da probabilidade limiar de propagação utilizada coincide com o comportamento do risco dado pela Figura 4, somente com a diferença de que os valores da função foram normalizados.

O autômato celular foi concebido em um domínio $\Omega = [0, L] \times [0, H]$ retangular com a vizinhança de Moore, ou seja, que o nó (x_i, y_j) possui oito vizinhos (x_{i+1}, y_{j+1}) , (x_{i+1}, y_{j-1}) , (x_{i-1}, y_{j+1}) , (x_{i-1}, y_{j-1}) , (x_{i+1}, y_j) , (x_{i-1}, y_j) , (x_i, y_{j-1}) , (x_i, y_{j+1}) . Os estados do autômato estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Estados do autômato celular

Número	Estado
0	Vazio
1	Vegetação
2	Queimando
3	Queimado

A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros utilizados nos autômatos celular com probabilidade constante e no autômato celular fuzzy.

Tabela 2: Principais parâmetros dos autômatos fuzzy e com probabilidade.

Parâmetro	Autômato	
	Fuzzy	Prob. Constante
Limiar de Propagação	$p(n)$	I
Prob. Presença de Vegetação	D	D
Limiar de Extinção	$B(n)$	B

A presença ou ausência de vegetação em cada nó dos autômatos está associada à probabilidade da presença de vegetação, apenas nós que possuem vegetação podem ser atingidos pelo fogo. O limiar de propagação é a probabilidade de um nó do autômato que possui vegetação ser atingido pelo fogo e passar para o estado “queimando” e o limiar de extinção é a probabilidade de um nó que está no estado “queimando” passar ao estado “queimado”, ou seja, é a probabilidade do fogo se extinguir naquele nó.

A principal diferença entre o autômato fuzzy e os autômatos com probabilidade constante é o fato do limiar de propagação do primeiro ser obtido da saída sistema fuzzy (risco de incêndio) considerado acima e é variável com o tempo. O limiar de extinção foi considerado variável para que o comportamento do autômato pudesse corresponder à realidade do fenômeno. Se o risco de incêndio for muito alto, a probabilidade limiar do fogo se extinguir é menor do que quando o risco é baixo, então uma escolha plausível para o modelo é que B seja uma função do risco.

Quando o risco de incêndio atinge o valor zero (isso ocorre diversas vezes durante o período de maior ocorrência dos focos de calor), por efeito de uma grande chuva, por exemplo, existe a possibilidade de que logo após aconteçam novos incêndios. Por esse fato, o autômato fuzzy permite a possibilidade de

que novos nós sejam queimados, com probabilidade $p(n)$, mesmo após o fogo ter sido completamente extinto em determinado instante t .

Para comparar os autômatos utilizados nesse trabalho, optou-se por observar as séries temporais dos percentuais de nós que estão queimando a cada instante de tempo e comparar essas séries tanto com o percentual de risco de incêndio fuzzy quanto com o percentual de focos de calor registrados por satélites observados no mesmo período.

4. Simulações

Ao se realizar a simulação utilizando as séries de umidade e precipitação para um ano completo, obteve-se o risco de incêndio para todos os dias do ano, que pode ser visualizado no gráfico da Figura 4.

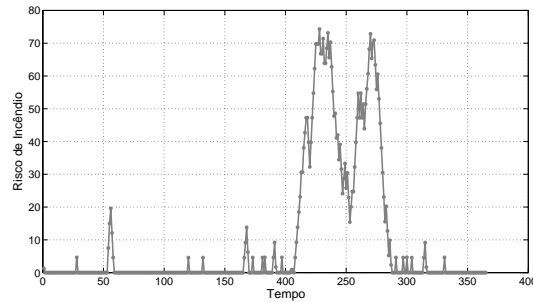


Figura 4: Risco de incêndios fuzzy

Para todas as simulações realizadas utilizaram-se os autômatos com dimensões $L = H = 501$ e o tempo t foi considerado no intervalo $[1, 365]$ correspondendo, portanto, a um ciclo anual. Foram utilizados quatro autômatos que possuem probabilidade limiar de propagação constante com valores: $\{0; 1; 0,05; 0,033; 0,025\}$. A escolha desses valores foi motivada pelo objetivo de realizar a comparação adequada entre as séries temporais que podem ser visualizadas na Figura 5(a).

O autômato fuzzy foi simulado com $I = p(n)$ (saída do sistema fuzzy) e a probabilidade $B = B(n)$ dada pela Equação 4.2 elaborada para permitir que o número de iterações que os nós do autômato dependa do risco de incêndio. Na tabela 3 estão apresentados os valores dos parâmetros para os dois tipos de autômatos.

Tabela 3: Probabilidades utilizadas nas simulações.

Autômato	Probabilidades		
	I	B	D
Prob. Constante	0,01	0,02	1
Fuzzy	p(n)	f(n)	1

Com a finalidade de comparar o efeito causado pela probabilidades variáveis $p(n)$ e $B(n)$ no autômato fuzzy, escolheu-se para todas as simulações o valor $D = 1$, ou seja, no estado inicial dos autômatos todos os nós possuem vegetação. Em trabalhos futuros, esse parâmetro pode ser definido através de características do local a ser estudado.

Nos autômatos com probabilidade constante, o valor de B foi escolhido de acordo com o valor de I para que a propagação do fogo não seja extinta antes de $t = 365$ dias. Já para o autômato fuzzy a função $B(n)$ é dada pela Equação 4.2.

$$B(n+1) = f(B(n)) = \begin{cases} 0,5.B(n), & \text{se } p(n) > 0 \\ 1,5.B(n), & \text{se } p(n) = 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

A Equação 4.2 foi proposta para que a probabilidade limiar de extinção do fogo seja incrementada quando o risco de incêndio for nulo e seja reduzida quando o risco seja positivo, essa regra deve ser ajustada em trabalhos futuros para adequar ao tempo real de duração do incêndio.

Na próxima seção será apresentado estudo comparativo entre os resultados dos autômatos fuzzy e com probabilidade constante.

5. Resultados

Para comparar cada série temporal com a sequência de percentuais de focos de calor ocorridos no ano de 2005 utilizou-se o coeficiente de correlação linear de Pearson, o qual está descrito abaixo, e os resultados estão na Tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes de correlação de Pearson das séries temporais do percentual de nós de cada autômato no estado queimando e do sistema fuzzy (risco de incêndio fuzzy) em relação à série temporal dos dados de percentual de focos de calor.

Autômatos	Correlação de Pearson
Probabilidade constante com $p=0,1$	-0,23657
Probabilidade constante com $p=0,05$	-0,09187
Probabilidade constante com $p=0,033$	0,24207
Probabilidade constante com $p=0,025$	0,33228
Fuzzy	0,68659

Seja $x = \{x_i\} \subset \mathbb{R}$ a série temporal de percentuais de nós do autômato celular no estado “queimando” e $y = \{y_j\} \subset \mathbb{R}$ a sequência dos dados (percentual de focos de calor) com $i, j \in \{1, \dots, N\}$. O coeficiente de correlação de Pearson r entre as sequências x e y , que representa a razão entre a covariância das duas variáveis pelo produto dos desvios-padrão de cada uma delas, é definido pela Equação 5.3.

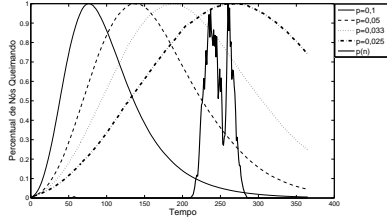
$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2\right) \left(\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2\right)}}, \quad (5.3)$$

onde \bar{x} e \bar{y} são, respectivamente, as médias aritméticas dos N valores considerados das sequências x e y .

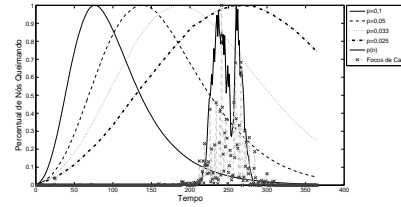
Segundo Lira (2004) e Callegari-Jacques (2003), o coeficiente de correlação linear (r) entre as sequências x e y descreve:

- se $r = -1$, a correlação linear é perfeita negativa;
- se $r = 0$, não existe correlação linear;
- se $0 < |r| < 0,30$, a correlação linear é fraca;
- se $0,30 \leq |r| < 0,60$, a correlação linear é moderada;
- se $0,60 \leq |r| < 0,90$, a correlação linear é forte ;
- se $0,90 \leq |r| < 1$, a correlação linear é muito forte.

- se $r = 1$, a correlação linear é perfeita positiva;

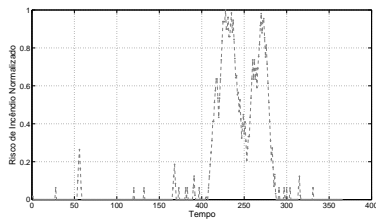


(a) Séries do percentual de nós “queimando” a cada iteração para os quatro autômatos que possuem probabilidade constante e para o autômato fuzzy.

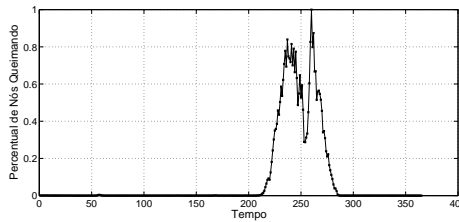


(b) Percentual diário de focos de calor comparados com as séries associadas aos cinco autômatos considerados.

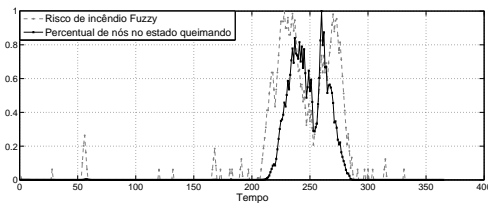
Figura 5: Séries temporais associadas aos autômatos e aos dados de focos de calor



(a) Gráfico do risco de incêndio fuzzy.



(b) Série temporal do percentual de nós do autômato fuzzy no estado “queimando”.



(c) Séries de percentuais de risco de incêndio fuzzy normalizado e de nós do autômato fuzzy no estado “queimando”.

Figura 6: Séries temporais associadas ao risco e ao autômato fuzzy.

Na Tabela 4 pode-se observar que a correlação entre as séries associadas aos autômatos com probabilidade constante e a série de dados diminui à medida que a probabilidade limiar aumenta. Esse fato é coerente uma vez que, à medida que essa probabilidade aumenta, a quantidade de nós que estão no estado “queimando” aumenta rapidamente e atinge o seu valor máximo antes do aumento da quantidade de focos de calor, por isso, quanto maior a distância (no tempo) entre o máximo da série gerada com a série de dados, menor é a correlação linear de Pearson entre elas.

Pode-se perceber que a série temporal associada ao autômato fuzzy possui correlação positiva forte e todas demais séries possuem ou correlação negativa ou correlação fraca e apenas a série temporal associada ao autômato com probabilidade $p = 0,025$ possui correlação moderada, ou seja, esse modelo de autômato acoplado a um sistema fuzzy consegue representar melhor o fenômeno da ocorrência temporal dos focos de calor. Isso pode ser explicado pelo fato do autômato fuzzy utilizar, em sua construção, as variáveis típicas para o fenômeno em questão (umidade e precipitação). Os gráficos das séries temporais associadas aos quatro autômatos com probabilidade constante e ao autômato fuzzy são mostrados na Figura 5(a).

Observando as séries temporais de risco de incêndio fuzzy e percentuais de nós queimando na Figura 6 pode-se verificar que a variação no risco de incêndio provoca uma variação no percentual de nós queimando no autômato fuzzy e que o intervalo de tempo em que há queima de nós coincide com o que o risco está elevado, ou seja, ao obter-se uma boa estimativa para o risco de incêndio fuzzy, obtém-se também uma boa estimativa para o comportamento da série temporal de nós queimando, considerando o período de tempo em que há a ocorrência de focos de calor, como pode ser observado no gráfico da Figura 6(c).

Isso foi possível através da eficiência do sistema fuzzy em obter uma sequência de valores de risco de incêndio, a partir dos dados de umidade e precipitação local, com uma boa taxa de acerto, conforme pode ser visto em (Silva e Pontes Jr., 2011). Além disso, à medida que o risco aumenta, a probabilidade limiar de extinção do fogo começa a diminuir.

A possibilidade que novos autômatos mudem para o estado “queimando”, mesmo após de não existirem autômatos vizinhos para propagar esse estado, diverge da modelagem de todos os outros trabalhos supracitados (se em determinada iteração não houver mais autômatos no estado “queimando” então a

simulação para) e concorda plenamente com a realidade, pois acontecem chuvas esparsas durante o período de seca que podem promover a momentânea extinção do incêndio, porém se houver a retomada posterior do período seco, o fenômeno da ocorrência de incêndios recomeça.

6. Conclusões

Nos modelos clássicos de risco de incêndios (que utilizam apenas variáveis climáticas) não é considerada a variação espacial do fogo, por isso a utilização de um autômato celular pode ser útil para traduzir essa variação temporal em variação espacial. A transferência dessa dinâmica temporal sintetizada a partir do sistema fuzzy para o autômato celular foi realizada com sucesso, haja vista que o percentual de nós no estado “queimando” responde satisfatoriamente ao risco de incêndio obtido conforme Figura 6(c).

A série temporal associada ao autômato fuzzy foi a que teve melhor semelhança com a série do percentual de focos de calor segundo o coeficiente de Pearson. Como a série de focos de calor está fortemente associada à ocorrência do fenômeno incêndio em determinada região, o melhor modelo é aquele que consegue representar melhor a série de focos de calor.

Percebe-se ainda que, no modelo proposto, existe a necessidade da inserção de parâmetros associados a variáveis locais tais como vegetação, declividade e outros, que possam direcionar a propagação de forma mais realista, porém a velocidade de propagação do fogo já foi ajustada com êxito a partir da associação entre as técnicas utilizadas e utilizando somente variáveis climáticas.

Para trabalhos futuros, deseja-se inserir características físicas na dinâmica do autômato tais como: vegetação, declividade do solo, altitude entre outros, para aperfeiçoar o espalhamento do fogo.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES e ao CNPq (processo número 305862/2013-8) pelo auxílio financeiro.

Referências

- Almeida, R. M., França, H., Macau, E. E. N., Ramos, F. M., e Carneiro, T. G. S. (2008). Simulando padrões de incêndios no parque nacional das Emas, estado de Goiás, Brasil. In *Proceedings of X Brazilian Symposium on GeoInformatics, Dec 8.10*, pag. 193–204, Rio de Janeiro, Brazil. IEEE Ed.
- Brown, I. F. e Vasconcelos, S. S. (2006). As queimadas de 2005 e seu impacto nas florestas do Acre. Disponível em ftp://fapespclima.ccst.inpe.br/lba/inpe/lba_archives/LC/LC-02/SETEM/Acre_Burned/Jornal_Pagina20p20_As_queimadas_e_seu_impacto_11jan06.pdf Acesso em: 15/03/2015.
- Callegari-Jacques, S. M. (2003). *Bioestatística: princípios e aplicações*. Ed. Artmed, Porto Alegre.
- INPE, D. P. I. (2011). Divisão de processamento de imagens. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/>. Acesso em: 20/03/2015.
- Lira, S. A. (2004). Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações. Dissertação de Mestrado, Setores de Ciências Exatas e de Tecnologia–UFPR, Curitiba/PR.
- Louzada, V. H. P. e Ferreira Jr., W. C. (2008). Incêndios florestais em autômatos celulares, simples e grandes queimadas. *Biomatemática*, 18:15–26.
- Nunes, J. R. S., Soares, R. V., e Batista, A. C. (2007). Ajuste da fórmula de monte alegre alterada (fma+) para o estado do Paraná. *Floresta*, 37:1–14.
- Nunes, J. R. S., Soares, R. V., e Batista, A. C. (2008). *Manual de prevenção e combate a incêndios florestais 2ª edição*. Editado pelos autores, Curitiba.
- Pantoja, N. V. e Brown, I. F. (2007). Acurácia dos sensores avhrr, goes e modis na detecção de incêndios florestais e queimadas a partir de observações aéreas no estado do Acre, Brasil. In *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Florianópolis, Brasil*, pag. 4501–4508.
- Santos, J. P. C. M. (2007). Aplicação de um modelo de autômatos celulares à propagação de fogos no parque natural da serra da Arrábida. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências – Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

- Silva, I. D. B. e Pontes Jr., A. C. F. (2011). Elaboração de um fator de risco de incêndios florestais utilizando lógica fuzzy. *Biomatemática*, 21:113–128.
- Soares, R. V. e Batista, A. C. (2007). *Incêndios florestais controle, efeitos e uso do fogo*. Editado pelos autores, Curitiba.
- Vasconcelos, S. S., Fearnside, P. M., e Brown, I. F. (2009). Focos de calor no sudoeste da amazônia: indicadores de mudanças no uso da terra. In *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), Natal, Brasil*, pag. 6353–6360.