

Avaliação preliminar da modelagem de queimadas na Amazônia brasileira utilizando o princípio da Máxima Entropia

Marisa Gesteira Fonseca¹
André Lima¹
Liana Oigshenstein Anderson^{2,3}
Yosio Edemir Shimabukuro¹
Luiz Eduardo Oliveira Cruz Aragão¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{mfonseca, andre, yosio, laragao}@dsr.inpe.br

²Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Naturais – CEMADEN
Parque Tecnológico de São José dos Campos, Estrada Dr. Altino Bondensan, 500, 12247-016
- São José dos Campos - SP, Brasil
liana.anderson@cemaden.gov.br

³Environmental Change Institute, ECI, University of Oxford
South Parks Road, Oxford, OX1 3QY, UK

Abstract. Climate change, forest fragmentation, and the increase in secondary vegetation cover are expected to amplify fire incidence in the Amazon. The negative impacts of forest fires on biodiversity, precipitation and the dynamics of atmospheric circulation, human health, forest structure, biomass and carbon stock have been recognized in the literature. The development and implementation of better fire management practices and firefighting strategies are therefore important steps to reduce forest degradation and carbon emissions from land use change in the region. Here we extend the application of Maximum Entropy method (Maxent) to model fire risk in the Brazilian Amazon using an innovative combination of climatic variables (sea surface temperature anomalies, precipitation and accumulated water deficit), inhabited and uninhabited protected areas and land use (deforestation, pasture, and forest regeneration) maps. The model was calibrated to forecast hot pixels occurrence in September 2008 and September 2010, two years of contrasting fire incidence. Tests were carried out to determine the regularization multiplier (a user defined parameter that influences model complexity) that maximizes model fit. Model fit was assessed using the AUC value (threshold independent analysis), binomial tests and model sensitivity and specificity (threshold dependent analysis). Both threshold dependent and independent model evaluations showed that Maxent can be successfully used in operational routines for monthly hot pixels occurrence prediction and hence applied in prevention programs and firefighting planning.

Palavras-chave: fogo, Maxent, multiplicador do fator de regularização, MODIS, fire, regularization multiplier.

1. Introdução

A tendência de aumento da frequência e severidade de eventos de seca na Amazônia tem sido amplamente reconhecida na literatura (e.g. Marengo et al. 2008, Malhi et al. 2008, Lewis et al. 2011). Estima-se que a combinação de mudanças climáticas e desmatamento pode aumentar em 49% a ocorrência de incêndios fora de áreas protegidas na Amazônia entre 2010 e 2050 (Silvestrini et al. 2011). A fragmentação florestal e o crescimento de vegetação secundária também deverão contribuir para o aumento da ocorrência de fogo na Amazônia (Aragão et al. 2014).

Os impactos negativos de incêndios florestais na biodiversidade (e.g. Slik et al. 2002, Barlow e Peres 2004, Barlow e Peres 2006), precipitação e circulação atmosférica (Andreae et al. 2004), saúde humana (Smith et al. 2014, Carmo et al. 2013), estrutura florestal, biomassa e estoque de carbono (Barlow e Peres 2004, Alencar et al. 2006, Berenguer et al. 2014, Brando et al. 2014,) têm sido documentados. O desenvolvimento e implementação de práticas de manejo e combate do fogo é, portanto, um passo crítico para reduzir a degradação florestal e

as emissões de carbono provenientes do uso do solo na região (Chen et al. 2011, Aragão et al. 2014).

Alguns estudos pioneiros desenvolveram modelos de ocorrência de fogo na Amazônia (e.g. Cardoso et al. 2003, Nepstad et al. 2004, Alencar et al. 2004, Golding e Betts 2008). Avanços mais recentes na modelagem de fogo na Amazônia podem ser encontrados nos trabalhos de: i) Fernandes et al. (2011), que relacionam queimadas no oeste da Amazônia com anomalias da temperatura de superfície do mar (TSM) no oceano Atlântico Tropical; ii) Chen et al. (2011), que relacionam a severidade da estação de fogo em diferentes regiões da Amazônia com anomalias de TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico usando um grid de 5° de resolução; iii) Justino et al. (2011), que modelaram os impactos das mudanças climáticas sobre o risco de incêndios no Brasil; e iv) Silvestrini et al. (2011), que modelaram a ocorrência de focos de queimadas usando variáveis antropogênicas e déficit de pressão de vapor para simular regimes de fogo na Amazônia até 2050 considerando cenários futuros de mudanças climáticas, desmatamento e expansão de estradas.

Em um estudo para a costa oeste da Índia, Renard et al. (2012) utilizaram o método da Máxima Entropia (Maxent) para avaliar quantitativamente os fatores ambientais que influenciam a distribuição espacial de focos de queimada. O Maxent é um método para fazer prognósticos a partir de informações incompletas, com aplicações em diversas áreas. Em estudos biológicos, o Maxent foi introduzido e tem sido utilizado com sucesso como ferramenta para modelar a distribuição de espécies em função de variáveis ambientais (Phillips et al. 2004, Phillips et al. 2006, Couturier et al. 2014, Pena et al. 2014, Giovanni et al. 2014).

O objetivo do presente estudo foi avaliar o uso do método Maxent para modelar o risco de queimadas na Amazônia Brasileira utilizando uma inovadora combinação de variáveis climáticas (anomalias da TSM, precipitação e déficit hídrico acumulado), mapas de áreas protegidas (unidades de conservação e terras indígenas) e de uso do solo (desmatamento, pasto e vegetação secundária). Testes foram realizados para determinar o multiplicador do fator de regularização (MFR), um parâmetro definido pelo usuário e que determina a complexidade do modelo. A acurácia do modelo em projeções da ocorrência de focos de queimada foi avaliada para o mês de setembro de um ano de baixa (2008) e outro de alta (2010) incidência de fogo na Amazônia.

2. Metodologia de Trabalho

O presente estudo abrangeu a área da Amazônia Legal, dividida em uma grade de 0,25° de resolução espacial. A calibração dos dois modelos foi feita usando dados de focos de queimada de agosto de 2008 e de 2010 detectados pelo sensor MODIS do satélite AQUA, disponibilizados na internet pelo Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios (INPE, 2012). Tendo em vista que uma queimada pode ser detectada muitas vezes pelo mesmo satélite e para evitar autocorrelação espacial dos dados, a calibração foi feita utilizando a opção “excluir duplicatas” do programa, removendo focos repetidos dentro da mesma célula de 0,25° (Phillips e Dudik 2008, Couturier et al. 2014, Giovanni et al. 2014).

Foram utilizadas 11 variáveis preditoras com base na literatura sobre fatores que influenciam a ocorrência de queimadas na Amazônia. As variáveis climáticas incluídas no modelo foram a precipitação mensal (derivada de dados da *Tropical Rainfall Measuring Mission* – TRMM, produto 3B43 v7A), déficit hídrico mensal acumulado (Aragão et al. 2007) e anomalias de TSM do oceano Atlântico, considerando dados dos meses maio, junho e julho de 2008 e de 2010. As variáveis de uso da terra incluíram o desmatamento anual (incluindo mapas de dois anos antes de cada ano modelado; PRODES/INPE 2014a), desmatamento mensal (nos mesmos meses das variáveis climáticas; DETER/INPE 2014b), mapas de vegetação secundária e pasto de 2008 e 2010 (TERRACCLASS/INPE 2010), terras indígenas

(FUNAI 2014) e unidades de conservação (ICMBio 2014). Os modelos calibrados para agosto de 2008 e de 2010 foram então projetados para setembro dos respectivos anos, substituindo as variáveis mensais por dados de junho, julho e agosto.

A modelagem da ocorrência de focos de queimada foi feita com uso do programa Maxent (Phillips et al. 2004, Phillips et al. 2006) versão 3.3.3 utilizando o modo de saída do tipo logístico, que pode ser interpretado como uma superfície de adequabilidade normalizada, com valores que variam de 0 a 1. O programa Maxent estima a distribuição de probabilidade de máxima entropia, ou seja, a mais espalhada ou mais uniforme, submetida a um conjunto de condicionantes (Phillips et al. 2006). Transformações matemáticas das variáveis predictoras que são chamadas *features* no programa e o valor esperado de cada variável ou *feature* deve ser igual à sua média empírica nos pontos de ocorrência de focos de queimada no mês de calibração. As transformações podem ser do tipo linear, quadrática, produto, limiar ou *hinge* (similar ao limiar, mas com inclusão de uma função linear). Para obter uma solução, o Maxent maximiza a função de ganho, uma função de máxima verossimilhança que possui um termo de penalização para reduzir a super parametrização do modelo (Phillips et al. 2006, Merrow et al. 2013). A força da penalidade é determinada pelo coeficiente de regularização, definido por *default* para cada tipo de *feature*. Os coeficientes de regularização podem ser ajustados multiplicando-os por uma constante definida pelo usuário, daqui em diante referida como multiplicador do fator de regularização (MFR), para produzir modelos mais ou menos complexos (Elith et al. 2011). A regularização evita a super parametrização garantindo que as condicionantes empíricas não sejam atendidas tão perfeitamente e penalizando a complexidade do modelo, aproximando coeficientes de zero e removendo *features* do modelo. Tendo em vista que os parâmetros ótimos do programa variam de acordo com o alvo modelado, localidades de ocorrência, região de estudo e dados ambientais, a definição do MFR caso a caso é recomendada, escolhendo-se um valor que maximize alguma medida de ajuste do modelo (Merrow et al. 2013, Radosavljevic e Anderson 2014). Valores de MFR de 1 a 7 foram testados para o mês de setembro de 2008, avaliando-se o valor resultante do AUC (*Area Under de Curve*) de teste (veja abaixo). O AUC é uma medida que quantifica a probabilidade do modelo fornecer um valor mais alto para uma localidade de ocorrência do que para uma área onde não há ocorrência do alvo modelado (Phillips et al. 2006), constituindo uma avaliação independente de limiar, ou seja, da definição de uma probabilidade acima da qual seria prevista a ocorrência de fogo. Se o valor do AUC é 0,5 o modelo não é melhor do que o acaso, enquanto valores próximos a 1 indicam um desempenho satisfatório (Fielding e Bell 1997). Modelos com valores de AUC acima de 0,75 são considerados potencialmente úteis (Elith 2002). A técnica de *bootstrap* com 50 repetições foi utilizada para estimar a média e desvio padrão dos valores obtidos (Verbyla e Litvaitis 1989), separando-se 30% dos pontos de ocorrência de focos para o teste do modelo.

Foram realizados ainda testes binomiais unicaudais (avaliação dependente de limiar) para avaliar se cada modelo prevê a ocorrência de focos significativamente melhor que o acaso (Phillips et al. 2006) usando valores de limiar de 0,2 a 0,7 em intervalos de 0,1. A sensibilidade e a especificidade do modelo para cada limiar foram calculadas (Phillips et al. 2006, Fielding and Bell 1997). A sensibilidade é a fração das células do grid com ocorrência de focos que são corretamente previstas como tal pelo modelo, representando a ausência de erro de omissão. Já a especificidade é a fração das células do grid sem ocorrência de focos que são corretamente previstas como tal.

3. Resultados e Discussão

O AUC de teste foi similar usando os MFRs de 2 a 7, mas levemente superior usando o MFR 4 (Figura 1), sendo este valor adotado nas análises subsequentes. As superfícies de

adequabilidade para ocorrência de focos de queimadas em setembro de 2008 e 2010, e os focos efetivamente registrados nestes meses são apresentados na Figura 2.

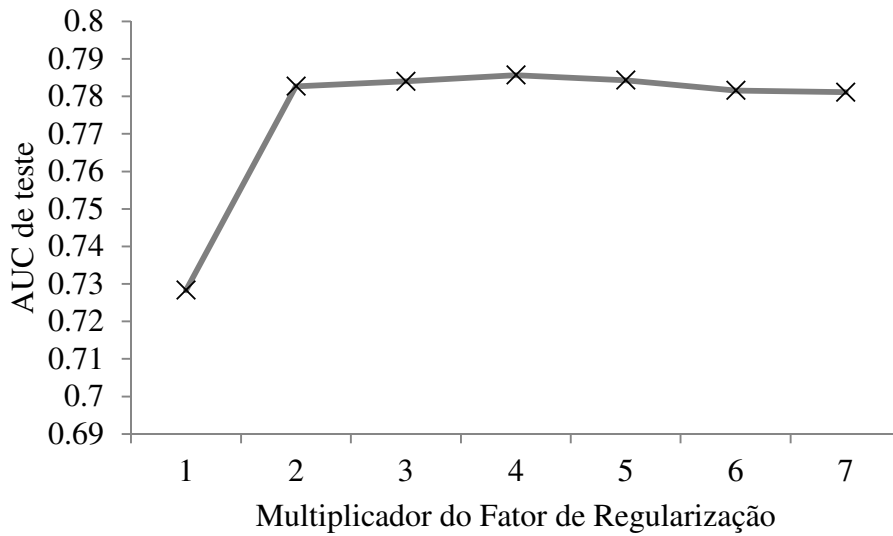


Figura 1: Valores do AUC de teste resultantes da adoção de diferentes valores do multiplicador do fator de regularização.

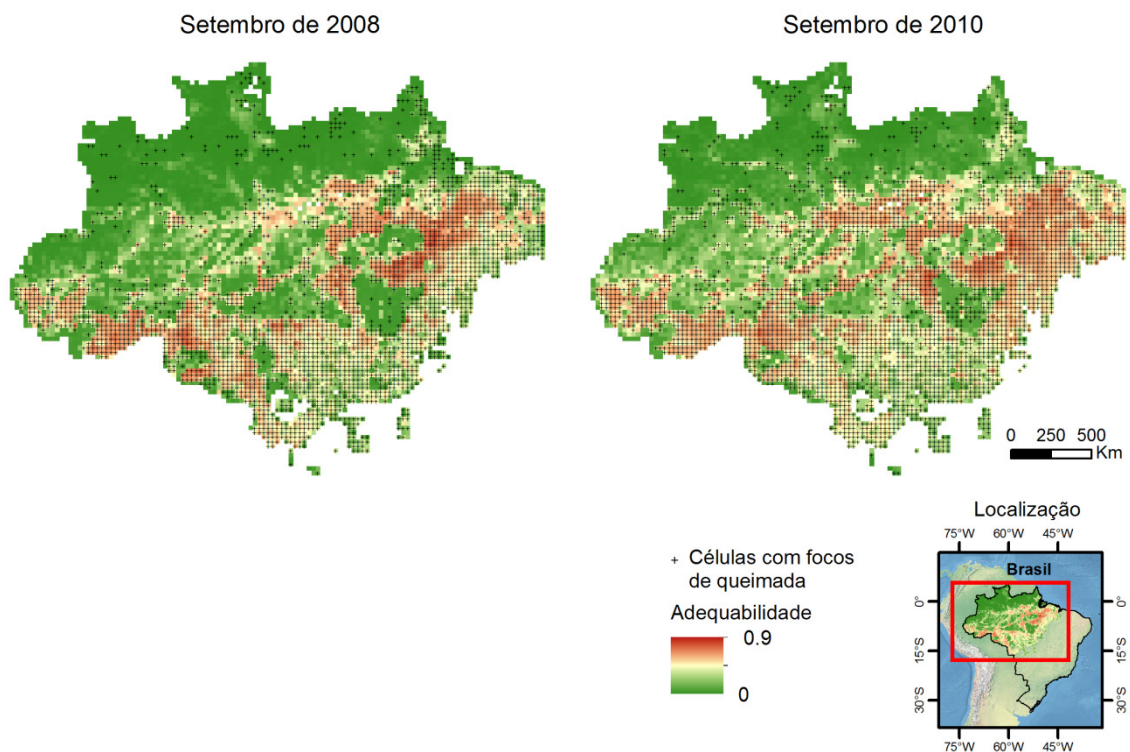


Figura 2: Superfícies de adequabilidade para ocorrência de focos de queimada projetadas para setembro de 2008 e de 2010 na Amazônia Legal com o método da máxima entropia e células que apresentaram focos nos respectivos meses.

O valor de AUC no modelo para setembro de 2008 foi igual a $0,843 \pm 0,006$ e igual $0,797 \pm 0,004$ no modelo para setembro de 2010, indicando desempenho satisfatório nos dois casos. Na avaliação dependente de limiar, o teste binomial foi altamente significativo ($p < 0,0001$) para ambos os anos em todos os limiares considerados, indicando que a previsão é melhor do que o acaso. Baseados em resultados semelhantes, Renard et al. (2012) concluíram que mapas de susceptibilidade ao fogo produzidos com o Maxent são úteis para aperfeiçoar o manejo e a prevenção de incêndios florestais na Índia. Estes autores ressaltaram ainda que a modelagem em diferentes escalas espaciais, considerando diferentes sub-regiões, podem fornecer *insights* importantes sobre o assunto. Para Amazônia brasileira, a modelagem de ocorrência de queimadas por bacias, por estados e/ou por hemisférios pode ser útil para aperfeiçoar as previsões e a compreensão dos fatores que controlam a ocorrência de queimadas em cada caso.

Como esperado, quanto maior o limiar de adequabilidade utilizado, menor é sensibilidade e maior a especificidade do modelo (Figura 3). Utilizando limiares até 0,4, obteve-se valores de sensibilidade e de especificidade iguais ou superiores a 0,6. Uma avaliação destes valores ao longo da estação seca é necessária para se definir o limiar mais apropriado para os fins em questão.

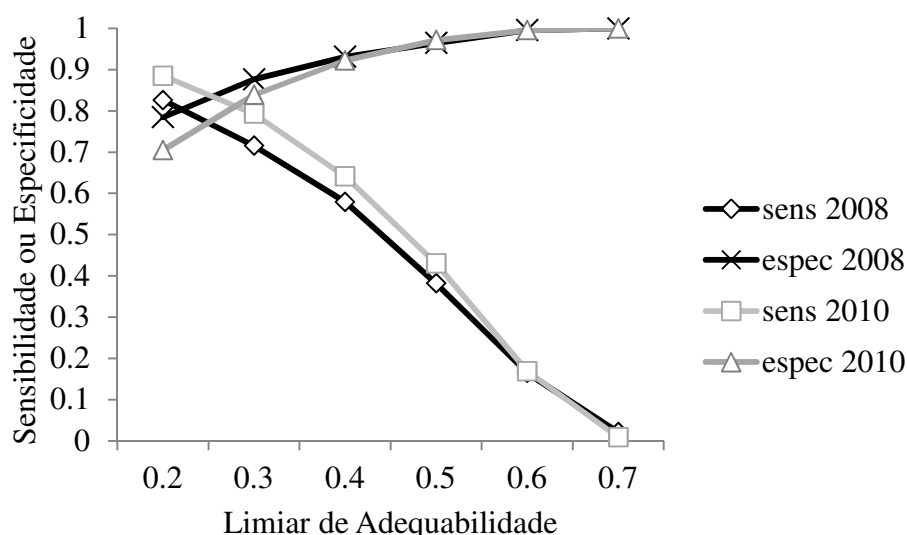


Figura 3: Sensibilidade (sens) e especificidade (espec) dos modelos para setembro de 2008 e 2010 considerando diferentes limiares de adequabilidade.

4. Conclusões

Tanto a avaliação dependente como a independente de limiar indicou que o Maxent pode ser usado em rotinas operacionais para a previsão de ocorrência de focos de queimada na Amazônia. O programa e os dados utilizados nas análises apresentadas são livremente acessíveis na internet, o que permite sua aplicação por instituições governamentais e não governamentais a baixo custo. Adicionalmente, o programa Maxent é flexível, permitindo facilmente a incorporação de novos dados que venham a se tornar disponíveis. Os resultados da modelagem podem ser combinados com mapas de áreas prioritárias, como unidades de conservação, terras indígenas e *hotspots* de biodiversidade, contribuindo assim para minimizar a degradação de ecossistemas amazônicos.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Dr. Milton César Ribeiro e aos integrantes do Laboratório de Ecologia de Espacial e Conservação da UNESP/Rio Claro pelo auxílio na

execução inicial do programa Maxent. M.G.F. agradece à Capes pela bolsa oferecida no âmbito do Programa Nacional de Pós-doutorado. L.O.A. agradece ao projeto Amazonica (<http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/amazonica> NERC- UK NE/F005806/1). L.E.O.C.A. agradece ao CNPq processo 458022/2013-6, FAPESP processo 11/51843-2 e ao Programa Ciência sem Fronteiras (CNPq).

Referências bibliográficas

Alencar, A. A. C.; Solórzano, L. A.; Nepstad, D. Modeling forest understory fires in an eastern Amazonian landscape. **Ecological Applications**, v. 14, p. 139-149, 2004.

Alencar, A. A. C.; Nepstad, D.; Diaz, M. C. V: Forest Understory Fire in the Brazilian Amazon in ENSO and Non-ENSO Years: Area Burned and Committed Carbon Emissions. **Earth Interactions**, v 10, p. 1–17, 2006.

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.; 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, L07701, doi:10.1029/2006GL028946, 2007.

Aragão, L. E. O. C.; Poulter, B.; Barlow, J.B; Anderson, L.O; Malhi, Y; Saatchi, S., Phillips, O.L.; Gloor, E. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, v. 89, p. 913-931, 2014.

Barlow, J.; Peres, C.A. Avifaunal responses to single and recurrent wildfires in Amazonian Forests. **Ecological Applications**, v. 14, p. 1358–1373, 2004.

Barlow, J.; Peres, C.A. Effects of single and recurrent wildfires on fruit production and large vertebrate abundance in a central Amazonian forest. **Biodiversity and Conservation** v. 15, p. 985-1012, 2006.

Berenger, E.; Ferreira, J.; Gardner, T. A.; Aragão, L. E. O. C.; Camargo, P. B.; Cerri, C. E.; Duringan, M.; Oliveira Junior, R. C.; Vieira, I. C. G.; Barlow, J. A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. **Global Change Biology**, In Press, 2014.

Brando, P. M.; Balch, J. K.; Nepstad, D. C.; Morton, D.C.; Putz, F. E.; Coe, M. T.; Silvério, D.; Macedo, M N.; Davidson, E. A.; Nóbrega, C. C.; Alencar, A.; Soares-Filho, B. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 111. P. 6347-6352, 2014.

Cardoso, M. F.; Hurtt, G.C.; Moore III, B.; Nobre, C. A.; Prins, E. M. Projecting future fire activity in Amazonia. **Global Change Biology**, v. 9, p. 656-669, 2003.

Carmo, C. N.; Alvez, M. B.; Hacon, S.S. Impact of biomass burning and weather conditions on children's health in a city of Western Amazon region. **Air quality, Atmosphere & Health**, v. 6, 517-525, 2013.

Chen, Y.; Randerson, J.T.; Morton, D.C.; De Fries, R. S.; Collatz, G. J.; Kasibhatla, P. S.; Giglio, L.; Jin, Y.; Marlier, M.E.. Forecasting Fire Season Severity in South America Using Sea Surface Temperature Anomalies. **Science**, v. 334, p. 787-791, 2011.

Couturier, T.; Besnard, A.; Bertolero, A.; Bosc, V.; Astruc, G.; Cheylan, M. Factors determining the abundance and occurrence of Hermann's tortoise *Testudo hermanni* in France and Spain: Fire regime and landscape changes as the main drivers. **Biological Conservation**, v. 170, p. 177-187, 2014.

Elith, J. Quantitative methods for modeling species habitat: Comparative performance and an application to Australian plants. In Ferson, S.; Burgman, M. (Eds.). **Quantitative methods for conservation biology**. New York: Springer-Verlag, 2002. Cap 1, p. 39–58.

Elith, J.; Phillips, S. J.; Hastie, T.; Dudik, M.; Chee, Y.E.; Yates, C. J. A statistical explanation of MaxEnt for Ecologists. **Diversity and distributions**, v. 17, p. 43-57, 2011.

Fernandes, K.; Baethgen, W.; Bernardes, S.; DeFries, R.; DeWitt, D.G.; Goddard, L.; Lavado, W.; Lee, D.E.; Padoch, C.; Pinedo-Vasquez, M.; Uriarte, M. North Tropical Atlantic influence on western Amazon fire season variability. **Geophysical Research Letters**, v. 38, L12701, doi:10.1029/2011GL047392, 2011.

Fielding, A.H.; Bell, J.F. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. **Environmental Conservation**, v. 24, p. 38–49, 1997.

Giovannini, A.; Seglie, D.; Giacoma, C. Identifying priority areas for conservation of spadefoot toad, *Pelobates fuscus insubricus* using a maximum entropy approach. **Biodiversity and Conservation**, v. 23; p.427-1439, 2014.

Golding, N.; Betts, R. Fire risk in Amazonia due to climate change in the HadCM3 climate model: Potential interactions with deforestation. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 22, GB4007, doi:10.1029/2007GB003166, 2008.

INPE. Projeto Prodes: Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por satélite. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>>. Acesso em: jan 2014.

INPE. Sistema Deter: Detecção de desmatamento em tempo real. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/deter/>>. Acesso em jan 2014.

INPE. Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios. Disponível em <<http://www.inpe.br/queimadas>>. Acesso em jan 2014.

INPE. TERRACLASS. Disponível em <http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2010.php>. Acesso em jan 2014.

Justino, F.; de Mélo, A. S.; Setzer, A.; Sismanoglu, R.; Sedyama, G. C.; Ribeiro, G. A.; Machado, J. P.; Sterl, A. Greenhouse gas induced changes in the fire risk in Brazil in ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. **Climatic Change**, v. 106, p. 285-302, 2011.

Lewis, S. L.; Brando, P.M.; Phillips, O.L.; van der Heijden, G. M.F.; Nepstad, D. The 2010 Amazon drought. **Science**, v. 331, p. 554, 2011.

Malhi, Y.; Roberts, J.T.; Betts, R. A.; Killeen, T. J.; Li, W.; Nobre, C.A. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. **Science**, v. 319, p. 169-172, 2008.

Marengo, J. A.; Nobre, C.A.; Tomasella, J.; Oyama, M. D.; Oliveira, G. S.; Oliveira, R.; Camargo, H.; Alves, L. M.; Brown, F. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, p. 495-516, 2008.

Merrow, C.; Smith, M. J.; Silander Jr., J.A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. **Ecography**, v. 36, p. 1058 -1069, 2013.

Nepstad, D. C.; Lefebvre, P.; da Silva, U. L.; Tomazella, J.; Schlensinger, P.; Solórzano, L.; Moutinho, P.; Ray, D.; Benito, J. G. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin wide analysis. **Global Change Biology**, v. 10, p.1–14, 2004.

Pena, J. C.C.; Kamino, L. H. Y.; Rodrigues, M.; Mariano-Neto, E.; Siqueira, M.F. Assessing the conservation status of species with limited available data and disjunct distribution. **Biological Conservation**, v. 170, p.130–136, 2014.

Phillips, S. J.; Dudik, M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. **Ecography** v. 31, p. 161-175, 2008.

Phillips, S. J.; Dudik, M. A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. In: Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning, p. 655-662, 2004.

Phillips, S. J.; Anderson, R. P.; Shapire, R. E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological Modelling**, v. 190, p. 231-259, 2006.

Radosavljevic, A.; Anderson, R. P. Making better MAXENT models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. **Journal of Biogeography**, v. 41, p. 629-643, 2014.

Renard, Q.; Péllisier, R.; Ramesh, B. R. Environmental susceptibility model for predicting forest fire occurrence in the Western Ghats of India. **International Journal of Wildland Fire**, v. 21, p. 368–379, 2012.

Silvestrini, R. A.; Soares-Filho, B.S.; Nesptad, D.; Coe, M.; Rodrigues, H.; Assunção, R. Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. **Ecological Applications**, v. 21, p. 1573–1590, 2011.

Slik, J. W.; Verburg, R. W.; Kebler, P. J. A. Effects of fire and selective logging on the tree species composition of lowland dipterocarp forest in East Kalimantan, Indonesia. **Biodiversity and Conservation**, v. 11, p. 85–98, 2002.

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.

Verbyla, D. L.; Litvaitis, J. A. Resampling methods for evaluating classification accuracy of wildlife habitat models. **Environmental Management**, v. 13, p. 783-787, 1989.