

Integração de dados de chuva, queimadas e modelo digital de terreno para caracterização de áreas complexas com fins de monitoramento operacional

Liana Oighenstein Anderson^{1,2}
Leonardo Bacelar Lima Santos¹
Conrado Rudorff¹
Celso Henrique Leite Silva Junior^{3,4}

¹ Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Naturais – CEMADEN
Parque Tecnológico de São José dos Campos, Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, São José dos Campos - São Paulo, 12247-016
{liana.anderson, leonardo.santos, conrado.rudorff}@cemaden.gov.br

² Environmental Change Institute, ECI, University of Oxford
South Parks Road, Oxford, OX1 3QY, UK

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil
celsohlsj@gmail.com

⁴ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas
Av. Trinta e Um de Março, nº 1020, Dom Cabral - 30535-000 - Belo Horizonte - MG, Brasil

Abstract. This study is an initiative for evaluating terrain, rainfall and fire data for characterizing a region with a complex pattern of fire dynamics and seasonal floods in central Brazil. For achieving this objective, we used hot pixels and burned area products, derived from MODIS sensor, rainfall, derived from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite and the digital elevation model, derived from Aster sensor, onboard Terra platform. For this initial work, we selected the *Formoso do Araguaia* municipality, located in the Tocantins state. Our results showed that high fire activities and fire recurrence are observed in the lowest areas in terms of elevation and also closer to the drainage systems. It is interesting to note that these areas, in our study site, refer to integral protection and sustainable use conservation areas, and thus fire is not allowed by law. Approximately 60% of the study area burned and more than 50% of the areas that burned presented a fire recurrence. Fire occurrence increases exponentially when rainfall is lower than 100 mm. The development of this research aims to expand these analyses for a large area, encompassing the Araguaia river floodplain. In order to achieve an operational monitoring system, collaboration with local environmental agencies and civil defense will be established.

Palavras-chave: Remote Sensing, natural disasters, fire, floodplain, HAND, sensoriamento remoto, desastres naturais, fogo, planície de inundação.

1. Introdução

O relatório Fifth Assessment Report – AR5 do Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas (IPCC - do inglês Intergovernmental Panel on Climate Change) declarou que há grande confiabilidade em que as ações humanas são os principais causadores do aumento da temperatura global observado desde a metade do século XX (IPCC, 2014). Esta alteração dos sistemas climáticos coloca a população humana em maior risco de sofrer consequências de desastres naturais e provoca alterações nos serviços ambientais.

Para a América do Sul, o IPCC identifica como riscos-chave as inundações e movimentações de terra devido a eventos extremos de chuva, diminuição da produção e qualidade de alimentos, e aumento de doenças transmitidas por artrópodes (IPCC, 2014). Especificamente para a região da Amazônia, estudos apontam para o aumento de eventos

extremos (Li et al., 2006), assim como na alteração dos padrões de precipitação (Malhi et al., 2011, Pokhrel et al., 2014) e mesmo observações de tendência em declínio de chuvas no nordeste da Amazônia já foram detectadas (Marengo, 2004), assim como foi observada uma tendência de declínio na precipitação nas estações meteorológicas do estado do Maranhão (Silva et al, 2014).

O monitoramento da cobertura vegetal, que inclui detecção de queimadas, é uma ação estratégica para o Brasil, e compõe o pilar base da Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei nº 12.187/2009, se enquadrando também no escopo da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC, por meio da Lei 12.608/2012. É bem estabelecido o forte sinergismo entre o fogo e o desmatamento. No entanto, a variação do clima exerce um papel importante sobre as queimadas. Em secas extremas, a taxa fotossintética da vegetação diminui e o número de mortalidade de árvores aumenta (Aragão et al., 2007, Aragão et al., 2014, Phillips et al., 2009, Gatti et al., 2014). Estes fatores potencializam consideravelmente a ocorrência queimadas.

As queimadas na Amazônia trazem grandes prejuízos sócio-econômicos, como perda de produção agrícola e pecuária, inviabilização do transporte aéreo (Anderson et al., 2008) e danos a saúde (Smith et al., 2014).

O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), vinculado ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) via Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisas e Desenvolvimento (SEPED), atua monitorando e emitindo alertas antecipados frente a desastres naturais para quase 1000 municípios monitorados com áreas de riscos.

O monitoramento de um país com dimensões continentais como o Brasil apresenta uma vasta gama de fenômenos e de interações complexas entre clima, sistemas naturais e sistemas antrópicos (Soler et al., 2013; Jorge et al., 2014). Esse desafio aponta para a necessidade de soluções interdisciplinares no desenvolvimento do monitoramento operacional a longo prazo de fenômenos em transformações, como as dinâmicas da cobertura terrestre.

Neste contexto, este estudo objetivou estudar a inter-relação entre os padrões espaço-temporais de queimadas e chuvas, visando subsidiar um futuro desenvolvimento de um sistema de monitoramento das dinâmicas das queimadas em planícies de inundações na região central do Brasil.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Área de estudo

O município selecionado para este estudo é o Formoso do Araguaia, localizado no extremo sudoeste do Estado do Tocantins (Figura 1), sendo parte do bioma Cerrado e pertencente à Amazônia Legal. A porção oeste do município está localizada na planície de inundação do Rio Araguaia, compreendendo parte da Ilha do Bananal. Esta área é considerada uma Floresta Pública Tipo A, ou seja, é uma área de uso sustentável, fazendo parte do Território Indígena Gurupi. É pertinente considerar que a Ilha do Bananal é considerada uma Reserva da Biosfera pela UNESCO desde 1993, sendo também uma das zonas úmidas de Importância Internacional, classificadas pela Convenção de Ramsar. Neste sentido, chama-se a atenção por esta área estar localizada em uma das regiões do país que apresentou o maior número de focos de calor nos últimos 11 anos (Figura 1).

O rio Araguaia tem uma vazão média anual de $1680 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. A precipitação na região é fortemente sazonal com média anual de 1700 mm. A inundação da várzea ocorre de forma sincronizada com a estação das chuvas local. O nível de água do Rio Araguaia varia em cerca de 5 m ao longo da passagem da onda de cheia sazonal, mas quase toda área da planície de inundação alaga com apenas 1-2 m de profundidade e torna-se seca a cada ano (Hamilton et

al., 2002). Desde 2013, Formoso do Araguaia foi selecionado com um dos municípios monitorados pelo Cemaden.

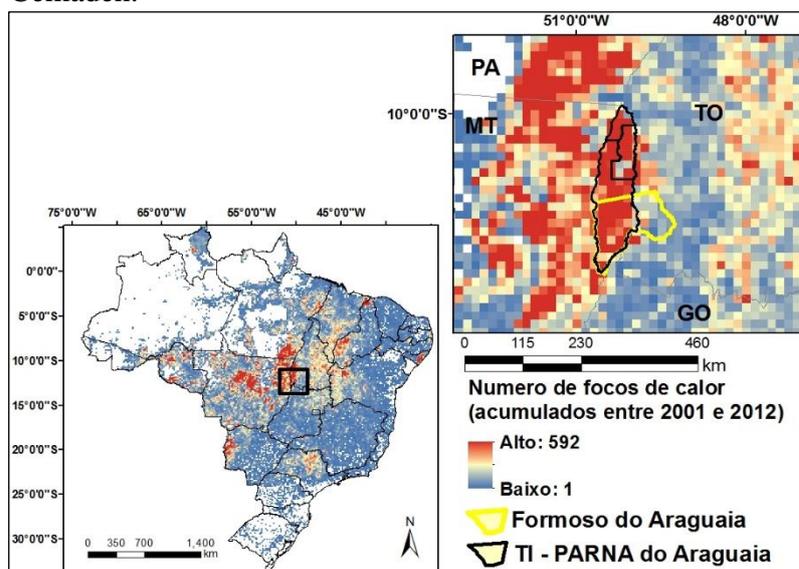


Figura 1. Localização da área de estudo. Tons em vermelho indicam alta incidência de focos de calor, tons azulados indicam baixa incidência de focos de calor, referente ao total acumulado entre os anos de 2001 e 2012, derivados do sensor MODIS/Terra. O limite do Município de interesse, Formoso do Araguaia, apresenta-se em amarelo. O limite em cor preta refere-se a Terra Indígena (TI) do Araguaia (polígono maior ao sul – área de uso sustentável) e duas áreas de proteção integral, o Parque Nacional (PARNA) do Araguaia (dois polígonos menores ao Norte).

2.2 Materiais

2.2.1 Dados de Queimadas

Foram utilizados dois tipos de dados referentes à queimada, os produtos de focos de calor e de área queimada, adquiridos através do portal <<http://modis-fire.umd.edu/>>.

- Focos de calor: utilizou-se o produto MODIS MCD14ML, coleção 5 (Giglio, 2010), para os anos de 2001 a 2012. Estes dados foram filtrados para incluir somente focos de calor detectados pelo satélite Terra, com confiabilidade igual ou superior a 80%. Para a área de estudo, os focos de calor foram detectados entre as 11hs e 17hs.
- Área queimada: utilizou-se o produto MCD45 coleção 5.1 (Boschetti et al., 2013). Esse produto é gerado mensalmente a partir de dados do MODIS Aqua e Terra, com uma resolução espacial de 500 metros. Foram adquiridos dados recobrando o período de 2001 e 2011.

2.2.2 Dados de precipitação

Os dados de precipitação foram obtidos através do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), lançado em 1997 em um programa de colaboração entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). Foram adquiridos dados para o período de Janeiro de 2001 a Dezembro de 2012 da versão 7 e 7A do produto 3B43 do satélite TRMM, produzido pela *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA). Os dados do produto 3B43 são disponibilizados no formato Hierarchical Data Format (HDF) em uma grade de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ graus, recobrando o globo terrestre entre as latitudes 50°N a 50°S .

2.2.3. Dados do terreno

Um Modelo Digital de Elevação (Digital Elevation Model – DEM) é uma estrutura computacional que armazena em formato matricial a altimetria de um terreno. No presente trabalho o DEM utilizado foi oriundo do projeto ASTER (“Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer”) (ASTER / JPL / NASA, 2014). O DEM ASTER é de download livre. Cada cena tem 3601 x 3601 pixels, cada pixel com 30m de lado, o que equivale a cenas de 1° de longitude por 1° de latitude.

2.2.4. Imagem de alta resolução disponível no Google Earth

A imagem de alta resolução Digital Globe de 28 de setembro de 2013, disponível no aplicativo *Google Earth* foi utilizada para delimitar visualmente a sede do município, áreas de agricultura e áreas de pecuária.

2.3 Métodos

Os dados do DEM ASTER foram utilizados para obtenção da matriz HAND, na qual cada elemento representa a elevação do ponto em relação à drenagem mais próxima (Rennó et al., 2008). O produto HAND foi calculado via TerraHidro, plug-in do software TerraView, ambos gratuitos. A informação trazida pelo HAND é uma *proxy* para as áreas alagáveis e com lençol freático mais próximo à superfície. O limiar utilizado para determinação da drenagem neste trabalho foi 0.405 km².

Em seguida, os dados de focos de calor e área queimada foram analisados espacial e temporalmente. Foram realizadas análises de regressão entre os dados mensais de focos de calor, área queimada e variáveis derivadas da análise de terreno e precipitação.

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização do terreno e potencial de inundação

Os mapas de altimetria (DEM) e elevação em relação à drenagem mais próxima (HAND) são apresentados na Figura 2. A planície de inundação é claramente distinguível do planalto de terra-firme no entorno: a região da planície de inundação a oeste representa uma área mais extensa, baixa, homogênea e com pequeno desnível em relação aos cursos d’água; a leste, se encontra uma área menor, mais heterogênea, com pontos de altimetria mais elevada e com desníveis em relação à drenagem mais próxima que chegam a ultrapassar os 100 metros.

Existe pouca diferença de elevação na porção oeste do município, onde está localizada parte da Ilha do Bananal e as áreas de proteção integral. Com base em uma análise visual das imagens de alta resolução do Google Earth, acredita-se que as áreas inundadas sazonalmente não ultrapassem as regiões localizadas acima de 200 m de elevação.

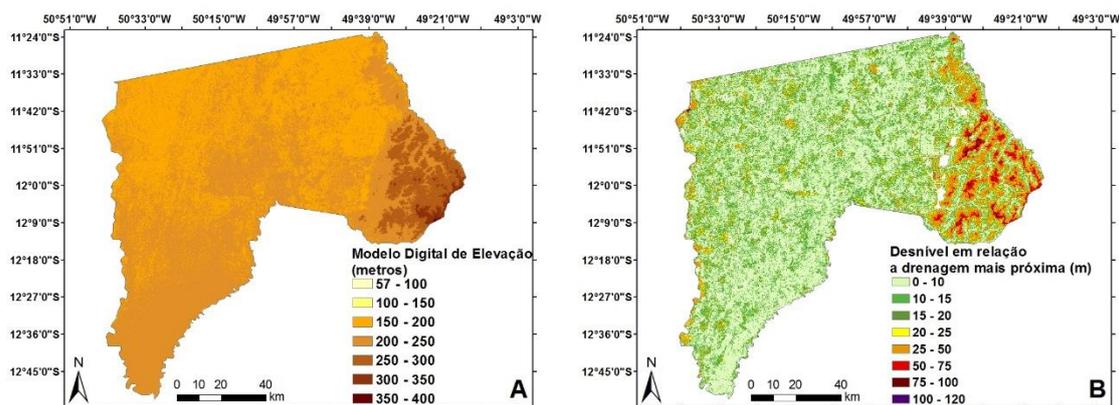


Figura 2. A) Modelo Digital de Elevação para o município de Formoso do Araguaia. Cada ponto do terreno foi representado com uma cor, do amarelo ao marrom, indicando o valor da altimetria. B) Desnível em relação à drenagem mais próxima (HAND), obtido com base no dado DEM-ASTER. Cada elemento da matriz representa o valor do HAND, em escala do verde à púrpura.

3.2. Relação entre as características do terreno e o padrão espacial de queimadas

Observa-se que a maior incidência de focos de calor ocorre nas áreas mais baixas e mais próximas a drenagem no município (Figura 4A, B). Observa-se também que aproximadamente 60% do município queimou pelo menos uma vez nos últimos 11 anos (Figura 4C), e que mais de 50% das áreas que queimam uma vez sofreram, ao menos uma recorrência de queimada. A análise do padrão espacial das áreas queimadas e com maiores recorrências de queimada mostra que as regiões mais afetadas estão localizadas nas áreas de proteção integral ou de uso sustentável, em que queimadas são proibidas por lei (Figura 4D). É interessante notar que as áreas delimitadas como pecuária através da análise visual de imagens de alta resolução não apresentam queimadas no período analisado (Figura 4D), o que as distingue dos modos tradicionais de limpeza de pasto por fogo observado em outros locais da Amazônia Legal. Por outro lado, as áreas identificadas como de agricultura intensiva, apresentaram entre uma a seis recorrências de queimada nos últimos anos, possivelmente indicando áreas onde foi realizada a conversão da cobertura original para uso de produção (Figura 4D).

O padrão observado nas figuras 4A e 4B é dado por uma função exponencial, onde o número de ocorrência de queimadas aumenta exponencialmente à medida que se diminui a elevação e o desnível em relação a drenagem mais próxima. Essa relação pode ser explicada pelo fato que nesse município essas áreas mais baixas onde ocorre a maioria das queimadas e apresenta a maior quantidade de recorrência de fogo são compostas principalmente por vegetação rasteira (gramíneas), áreas com maior frequência de queimadas no bioma Cerrado. Estas áreas caracterizam-se por recuperação rápida da biomassa possibilita a queima novamente no ano seguinte.

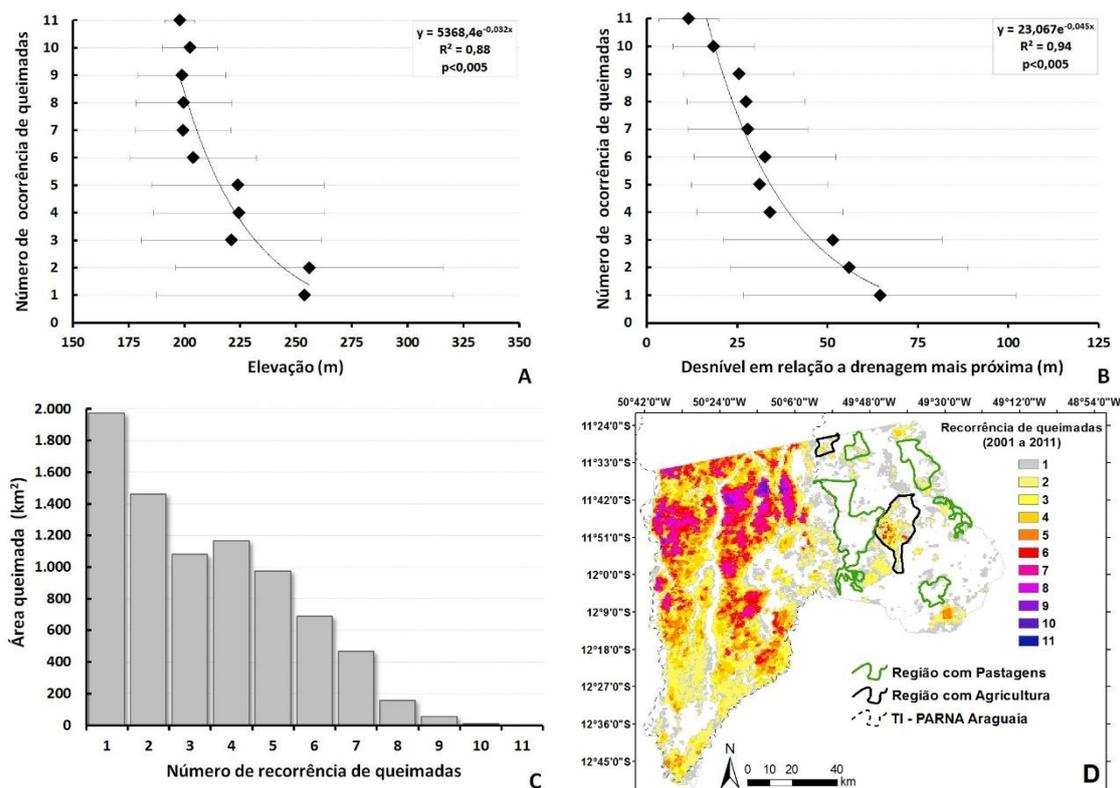


Figura 4. Padrão espacial das queimadas no município Formoso do Araguaia. Relação entre número de recorrência de queimadas, baseado no produto MOD45 em relação à elevação (A) e relação ao desnível da drenagem mais próxima (B). C) Total de área queimada em relação à frequência de re-queima. D) Espacialização da localização e área das queimadas nos últimos 11 anos.

3.3. Sazonalidade do fogo e chuva

Não existe uma relação clara entre as ocorrências de focos de calor e de área queimada neste município. Em anos em que foram observadas as maiores extensões de áreas queimadas (2005, 2007 e 2010), observaram-se altos números de focos de calor (Figura 5A). Estes anos de máximas em queimadas referem-se a dois anos anormalmente secos (2005 e 2010) (Marengo et al., 2011) e um ano anormalmente quente (2007). Por outro lado, o ano de 2009, que foi um ano de extremos em chuva e de inundações na Amazônia (Marengo et al., 2011), apresentou tanto uma pequena área queimada quanto um menor número de focos de calor que observados em outros anos. Este padrão de baixa detecção pode ser real, ou seja, de fato não houve um número expressivo de queimadas nesse ano, ou pode ser um artefato de sub-detecção por ser um ano que provavelmente houve uma maior cobertura de nuvens na região. Isto poderia explicar o padrão observado em 2006, em que há detecção de área queimada, mas não de focos de calor, que representam focos ativos (Figura 5A). Existe uma forte sazonalidade do fogo em relação às chuvas na área de estudo (Figura 5B), observa-se que número de focos de queimadas aumenta exponencialmente quando a chuva mensal é inferior a 100 mm (Figura 5B).

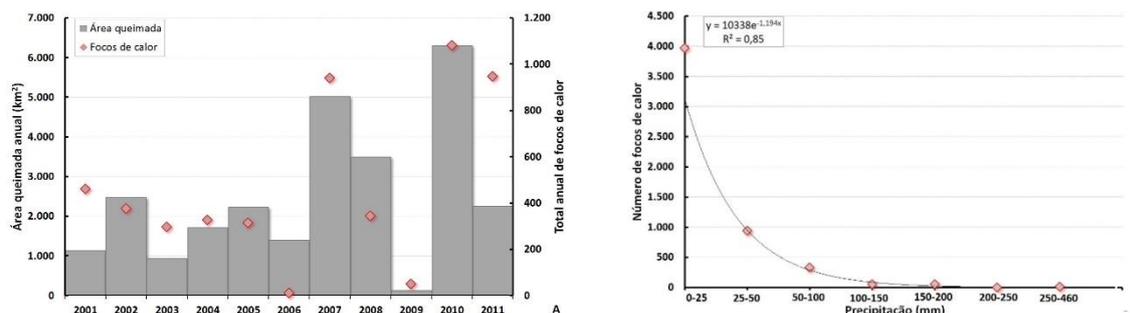


Figura 5. Padrão temporal das queimadas. A) Área total de queimadas e número total de focos de calor por ano. B) Relação entre número de focos de calor por mm de chuva.

5. Conclusões

O município Formoso do Araguaia apresenta uma região de planície e uma de planalto bem distinguíveis. Observa-se que a maior incidência de focos de calor ocorre nas áreas mais baixas e mais próximas a drenagem. Estas regiões de maior incidência e recorrência de queimadas correspondem as áreas de proteção integral e de uso sustentável, em que o uso do fogo é proibido por lei.

Dentre as perspectivas deste trabalho, esta a seleção de outros municípios para análise e, posteriormente, monitoramento integrado entre inundações e queimadas através de um modelo robusto que incorpore dados explícitos da hidrologia regional. Por exemplo, visa-se a combinação de dados de campo de estações hidrometeorológicas com imagens de radar de abertura sintética (e.g. ALOS SCANSAR), que permitirá uma melhor caracterização das áreas alagáveis.

Para fins de monitoramento operacional, pretende-se estabelecer colaboração com os órgãos de fiscalização ambiental e defesas civis municipais e regional.

4. Referências

- Anderson, L.O.; Trivedi, M.; Queiroz, J.; Aragão, L. E. O. C.; Marengo, J.; Young, C.; Meir, P. Counting the costs of the 2005 Amazon drought: A preliminary assessment, 2011. Referências adicionais: Grã-Bretanha/Inglês. Meio de divulgação: Meio digital. Home page: <http://www.globalcanopy.org/materials/ecosystem-services-poverty-alleviation-amazonia>.
- 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.
- ASTER / JPL / NASA. (2012). Disponível em <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>>. Acessado em outubro de 2014.
- Boschetti, L.; Roy, D.; Hoffmann, A.A.; Humber, M. **MODIS Collection 5.1 Burned Area Product - MCD45**, 2013. Disponível em: http://modis-fire.umd.edu/Documents/MODIS_Burned_Area_Collection51_User_Guide_3.0.pdf
- Defesa civil. (2012). Disponível em <<http://www.defesacivil.gov.br/index.asp>>, acessado em outubro de 2014.
- Gatti, L. V.; Gloor, M.; Miller, J. B.; Doughty, C. E.; Malhi, Y.; Domingues, L. G.; Basso, L. S.; Martinewski, A.; Correia, C. S. C.; Borges, V. F.; Freitas, S.; Braz, R.; Anderson, L. O.; Rocha, H.; Grace, J.; Phillips, O. L.; Lloyd, J. Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature**, v. 506, p. 76-80, 2014.
- Giglio, L. **MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide Version 2.4**. 2010. Disponível em: http://www.fao.org/fileadmin/templates/gfims/docs/MODIS_Fire_Users_Guide_2.4.pdf

Hamilton, S. K., Sippel, S. J., e Melack, J. M. Comparison of inundation patterns among major South American floodplains, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8038, 2002.

IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

Jorge, A. A. S. et al. (2014). Abordagem computacional livre para classificação de Strahler em hidrografias brasileiras relacionadas a desastres naturais. Aceito para publicação, MSEL - **Modelling in Science Education and Learning**. ISSN: 1988-3145

Li, W.; Fu, R.; Dickinson, R. E. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. **Journal of Geophysical Research**, 111 D02111, 2006.

Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., McSweeney, C., and Meir, P. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 106: 20610-20615, 2009.

Marengo, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical Applied Climatology**, 78 79–96, 2004.

Marengo, J. A.; J. Tomasella; L. M. Alves; W. R. Soares; and D. A. Rodriguez, The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, 38, L12703. 2011.

Phillips O.L.; Aragão L.E.; Lewis S.L.; Fisher J.B.; Lloyd J.; López-González G.; Malhi Y.; Monteagudo A.; Peacock J.; Quesada C.A.; van der Heijden G.; Almeida S.; Amaral I.; Arroyo L.; Aymard G.; Baker T.R.; Bánki O.; Blanc L.; Bonal D.; Brando P.; Chave J.; de Oliveira A.C. Drought sensitivity of the Amazon rainforest., **Science**, 323, pp.1344-1347, 2009.

Pokhrel, Y.N.; Fan, Y.; Macho-Miguez, G. Potential hydrologic changes in the Amazon by the end of the 21st century and the ground water buffer. **Environmental Research Letters**, 9, 084004, 2014.

Rennó, C.; Nobre, A.D.; Cuartas, A.L.; Soares, J.V.; Hodnett, M.G.; Tomasella, J.; Waterloo, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

Silva, F. B. et al. Análise espaço-temporal da precipitação no estado do Maranhão no período de 2003 a 2012. In: XIV SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS. **Anais...** Cubatão: COPEC, 2014.

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.

Soler, L. S.; Gregorio, L.T.; Leal, P.; Gonçalves, D.; Londe, L.; Soriano, E.; Cardoso, J.; Coutinho, M.; Santos, L.B.; Saito, S. **Challenges and perspectives of innovative digital ecosystems designed to monitor and warn natural disasters in Brazil**. In: MEDES '13 Proceedings of the Fifth International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems 2013, Luxemburgo. MEDES. Acessado em outubro de 2014: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2536191>.

Tominaga, L. K.; Santoro, J.; Amaral, R. (orgs) (2009). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto geológico. 196 p. ISBN 978-85-87235-09-1.