

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 03/03/2023.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE

**VARIAÇÃO HISTÓRICA E ESPACIAL DO REGIME DE FOGO DO CERRADO
PAULISTA**

DHEMERSON ESTEVÃO CONCIANI

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE

**VARIAÇÃO HISTÓRICA E ESPACIAL DO REGIME DE FOGO DO CERRADO
PAULISTA**

DHEMERSON ESTEVÃO CONCIANI

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ecologia e Biodiversidade.

Orientador: Thiago Sanna Freire Silva
Co-orientadora: Swanni Tatiana Alvarado

C744v

Conciani, Dhemerson Estevão

Varição histórica e espacial do regime de fogo do Cerrado paulista
/ Dhemerson Estevão Conciani. -- Rio Claro, 2021

90 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Biociências, Rio Claro

Orientador: Thiago Sanna Freire Silva

Coorientador: Swanni Tatiana Alvarado

1. Ecologia. 2. Ecologia do fogo. 3. Machine learning. 4.
Sensoriamento remoto. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **VARIAÇÃO HISTÓRICA E ESPACIAL DO REGIME DE FOGO DO CERRADO PAULISTA**

AUTOR: DHEMERSON ESTEVÃO CONCIANI DA COSTA

ORIENTADOR: THIAGO SANNA FREIRE SILVA

COORIENTADORA: SWANNI TATIANA ALVARADO ROMERO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE, área: Biodiversidade pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. THIAGO SANNA FREIRE SILVA (Participação Virtual)
Biological and Environmental Sciences / University of Stirling - Escócia



Profa. Dra. ANE AUXILIADORA COSTA ALENCAR (Participação Virtual)
Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia / Brasília - DF

Prof. Dr. DANIEL BORINI ALVES (Participação Virtual)
Pós Doutorando do Departamento de Biodiversidade / UNESP - Instituto de Biociências de Rio Claro - SP



Rio Claro, 03 de março de 2021

Dedico este trabalho ao sistema público de ensino

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento recebido (CNPq - 380522/2019-5). Ao Instituto Florestal do Estado de São Paulo (IF) e à Fundação Florestal Para Conservação e Produção Florestal do Estado de São Paulo (FF) pelo fornecimento de informações georreferenciadas das Unidades de Conservação, em especial à gestão, servidores e amigos da Estação Ecológica de Itirapina pelo intercâmbio profissional e hospitalidade. Agradeço ao United States Geological Survey – Center Science Processing Architecture (USGS-ESPA) pelo acervo de imagens orbitais e ao Observatório de Dinâmicas Ecosistêmicas (Ecodyn) pela troca de experiências e infraestrutura computacional.

Por fim, agradeço a minha família, orientadores, amigos, colegas, conhecidos, desconhecidos; afetos e desafetos; por contribuírem de diferentes formas em minha formação.

“ [...] Apenas que, busquem conhecimento!”

E.T. Bilu

RESUMO GERAL

O Cerrado ocupa 25% do território brasileiro, sendo considerado o segundo maior bioma do país, atrás apenas da floresta Amazônica. Nas últimas décadas o Cerrado experimentou um rápido declínio em sua vegetação nativa, sendo substituído principalmente por agricultura e pastagem. Hoje, menos de 8% do Cerrado encontra-se legalmente protegido no Brasil. Considerando o contexto do estado de São Paulo (SP), esta situação é ainda pior e menos de 1% da cobertura original do Cerrado encontra-se protegida. Neste cenário, os poucos remanescentes de vegetação nativa que restaram no estado de SP estão abrigados no interior de Unidades de Conservação (UC). Por sua vez, essas UCs possuem áreas que variam desde 200 hectares (ha) até 9000 ha, sendo consideradas relativamente pequenas quando comparadas à UCs de Cerrado em outros estados do Brasil. Considerando a raridade de áreas protegidas no Cerrado paulista, a conservação efetiva dessas UCs é fundamental para garantir a provisão de serviços ecossistêmicos e a preservação da biodiversidade. Contudo, as atividades desenvolvidas nas zonas de amortecimento (ZA), isto é, no entorno imediato dessas UCs, impactam negativamente sobre a conservação, contribuindo para disseminação de espécies invasoras e na ignição de queimas acidentais e criminosas. Buscando contribuir no entendimento dessa dinâmica, nós desenvolvemos um algoritmo, geramos e validamos um produto de áreas queimadas adaptado para o contexto do Cerrado paulista entre 1985 e 2018 (acurácia= 79%, erro de omissão= 16%, erro de comissão= 9%). Através de uma análise combinada entre os padrões de área queimada e as mudanças no uso e cobertura do solo nas últimas três décadas, nós identificamos que o padrão de queimadas no Cerrado paulista pode ser explicado pelo tipo de uso do solo. De um modo geral, o regime de fogo nesta região pode ser caracterizado como antrópico, ocorrendo principalmente em áreas de pastagem e cultivos de cana-de-açúcar. As UCs com cobertura predominantemente florestal não queimaram ou pouco queimaram ao longo da série temporal analisada. Por outro lado, picos de área queimada foram identificados a cada 8-9 anos para as UCs campestres enquanto ciclos de queima a cada 2-3 anos foram identificados nas UCs com densa invasão por gramíneas africanas. Novas estratégias de manejo que deem autonomia e

segurança jurídica para os gestores prescreverem queimas controladas precisam ser implementadas no Cerrado paulista, especialmente nas UCs campestres. Por outro lado, as UCs densamente invadidas por gramíneas africanas coincidem com áreas de conflito fundiário e/ou forte pressão urbana. Nesse contexto, é preciso buscar alternativas de restauração para essas áreas e fomentar a inclusão das comunidades locais em um modelo de gestão participativa como forma de mitigar os efeitos das pressões antrópicas e aumentar a efetividade de conservação dessas áreas.

Palavras-chave: Ecologia do fogo; Ecologia Vegetal; Unidades de Conservação; Machine Learning; Sensoriamento Remoto; Landsat.

ABSTRACT

Cerrado cover 25% of the Brazilian territory, being considered the second-largest biome in the country, only behind the Amazon rainforest. In recent decades, the Cerrado has experienced a rapid decline in its native vegetation, being replaced mainly by agriculture and pasture. Recently, less than 8% of the Cerrado is legally protected in Brazil. Considering the context of the state of São Paulo (SP), this situation is even worse and less than 1% of the original Cerrado area is protected. In this scenario, the fewer remnants of native vegetation that currently occurs in the state of SP are sheltered inside Protected Areas (PA). Area of these PAs ranges from 200 hectares (ha) to 9000 ha, being considered relatively small when compared to Cerrado PAs in other Brazilian regions. Considering the rarity and context of PAs in the São Paulo's Cerrado, the effective conservation of these PAs is essential to guarantee the provision of ecosystem services and the biodiversity conservation. However, the activities carried out in the buffer zones (BZ), that is, in the immediate surroundings of these PAs, negatively impact conservation, contributing to the spread of alien species and the ignition of accidental and arson fires. To contribute to the understanding of this dynamic, we developed an algorithm, generated and validated a product of burned areas adapted to the context of the São Paulo's Cerrado between 1985 and 2018 (accuracy = 79%, omission error = 16%, commission error = 9%). Through a combined analysis of burnt area patterns and changes in land use and land cover over the last three decades, we identified that the burned area pattern in the São Paulo's Cerrado can be explained by the type of land use. In general, the fire regime in this region can be considered as anthropogenic, occurring mainly in pasture areas and sugarcane crops. PAs with predominantly forest cover did not burn or burned few times over the analyzed time series. On the other hand, peaks of burned area were identified every 8-9 years within grassland PAs, while burning cycles every 2-3 years were identified in PAs with dense invasion by African grasses. New management strategies that provide autonomy and legal security to PA managers to execute prescribed fires needs to be implemented in São Paulo's Cerrado, mainly in grassland PAs. On the other hand, PAs densely invaded by African grasses coincide with areas of land conflict and/or strong urban pressure. In this context, it's necessary to seek restoration alternatives for

these degraded PAs as well encourage the inclusion of local communities in a participative management model as a way to mitigate the effects of human pressures and increase the effectiveness of the São Paulo's Cerrado conservation.

Key-words: Fire Ecology; Plant Ecology; Protected Areas; Machine Learning; Remote Sensing; Landsat.

SUMÁRIO

Introdução geral	10
Objetivo geral	12
Objetivos específicos	12
Referências bibliográficas	12
Developing a machine learning based algorithm for regional time-series burned area mapping: The highly anthropized Cerrado challenge	15
Abstract	16
Introduction	17
Material and Methods	19
Study area	19
Algorithm workflow	20
Building spectral library	21
Pre-processing	25
Model training and testing	26
Burned area validation	28
Post-processing	31
Final product compilation	32
Results and Discussion	32
Hyperparameters tuning and model selection	32
Multivariate Adaptive Regression Splines – MARS	32
Random Forest – RF	33
Extreme Gradient Boosting – XGB	35
Final model selection	37
Predictor’s importance	38
Burned area validation	40
Final product and data access	48
Known issues and future development	48
Conclusion	50
Acknowledgements	51
References	51
Supplementary	57

The conservation paradox on highly anthropized Cerrado: Protect to burn or burn to protect?	60
Abstract	61
Introduction	62
Methods	64
Study area	64
Management context	67
Landscape structure	67
Data collection	68
Protected areas and buffer zones	68
Burned area	69
Land cover and land use changes	69
Data processing and analyses	69
Pre-processing burned area data	69
Burned area by land cover and land use	70
Fire regime metrics	70
Results and Discussion	71
General burned area pattern from the highly anthropized Cerrado	71
Fire frequency within protected areas	74
Spatio-temporal variation of burned areas across PAs and its buffer zones	77
Management implications and future perspectives	80
Conclusion	82
Acknowledgments	83
References	83
Supplementary	87
Considerações finais	91

INTRODUÇÃO GERAL

O Cerrado é um conjunto de ecossistemas cuja classificação formal suscita divergências ainda nos dias atuais, sendo apresentado como um único bioma (IBGE, 2019), um conjunto de diversos biomas (Batalha, 2011) ou um domínio fitogeográfico (Leopoldo Magno Coutinho, 2006). O Cerrado ocupa uma área de aproximadamente 2 milhões de km² (25% do território brasileiro), estendendo-se do norte do estado do Paraná até o litoral do Maranhão, pelo qual possui interfaces de transição com a Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica e Pantanal (Durigan & Ratter, 2016; IBGE, 2019). Caracterizado pelo mosaico de fitofisionomias que variam desde formações campestres (campo limpo), formações savânicas (campo sujo, campo cerrado, cerrado típico) até as formações florestais (cerradão e mata de galeria), é considerado a savana mais biodiversa do planeta em termos de espécies de plantas (Oliveira & Marquis, 2002; Overbeck et al., 2015).

Os primeiros trabalhos sobre a distribuição de ecossistemas no Cerrado buscavam explicar a variação de tipos vegetacionais através da gênese geomorfológica (Eiten, 1972) e dos componentes edáficos como a fertilidade do solo (Goodland & Pollard, 1973). Posteriormente, trabalhos na área de ecologia do fogo demonstraram que as fisionomias do Cerrado e sua composição florística possuem estreita relação com a frequência e intensidade de distúrbios, sobretudo das queimas (L. M. Coutinho, 1982, 1990; Mistry, 1998). Desde então, trabalhos-chave têm apresentado evidências cada vez mais robustas a respeito da função ecológica e evolutiva do fogo nos ecossistemas de Cerrado (Bond et al., 2004; Pivello, 2011; Simon et al., 2009; Simon & Pennington, 2012).

Caracterizado pela alternância entre estações secas e chuvosas bem definidas nos últimos 2 milhões de anos, as espécies de plantas do Cerrado evoluíram adaptadas a ocorrência de queimas naturais ocasionadas por raios durante as tempestades de transição entre estações, especialmente no final da seca (William J. Bond & Keeley, 2005; Ramos-Neto & Pivello, 2000). Contudo, a domesticação do fogo pelo ser humano e seu emprego histórico com as mais diversas finalidades representaram para as savanas antropizadas uma nova fonte de ignição que não a natural, pelo qual o ser humano assumiu o papel de principal causador e supressor de queimas nestes ecossistemas (Goldammer & G., 1993). Atualmente o Cerrado encontra-se criticamente fragmentado e densamente povoado,

sendo que apenas 7% de sua área total encontra-se legalmente protegida (Soares-Filho et al., 2014). Este mosaico formado entre remanescentes naturais e os mais variados tipos de uso do solo agrava-se em locais como o estado de São Paulo onde apenas 0,84% do Cerrado está protegido e inserido em um contexto de forte pressão agrícola, pastoril e urbana (Alencar et al., 2020; Kronka et al., 2005), alterando o regime de fogo destas áreas (Archibald, 2016; Conciani et al., 2021).

Atualmente a reconstrução do histórico de queimas constitui base fundamental na decodificação de processos ecológicos, subsidiando a tomada de decisões e a elaboração de políticas públicas que levem em conta a história natural em nível ecossistêmico. Neste sentido, o sensoriamento remoto e a ciência da computação têm contribuído sobremaneira na consolidação de metodologias e na geração de produtos de áreas queimadas cada vez mais adequados aos diferentes contextos e aplicações (Bastarrika et al., 2014; Hawbaker et al., 2017; Ramo & Chuvieco, 2017).

Considerando o contexto do estado de São Paulo, os últimos remanescentes de vegetação nativa do Cerrado encontram-se protegidos em esparsas Unidades de Conservação (UC) sobre gestão do Instituto Florestal e da Fundação Florestal, ambos vinculados à Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Compartilhando a mesma política de exclusão do fogo e brigadas de incêndio, essas UCs experimentam diferentes níveis de pressão antrópica, sendo o fogo relatado como uma das principais ameaças à sua conservação (Durigan et al., 2007), especialmente nas UCs de formações campestres.

Nesse sentido, através de uma abordagem inovadora, nós buscamos combinar os mais recentes avanços em classificação de imagens utilizando aprendizagem de máquina e o vasto acervo de imagens em média resolução espacial (30 metros) e temporal (16 dias) da série Landsat para criar um algoritmo, gerar e validar um produto de áreas queimadas para todo o Cerrado paulista entre 1985 e 2018 (capítulo 1). Esta abordagem permitiu-nos considerar as condições regionais de alta variação no uso e cobertura do solo, resolvendo alguns problemas detectados em outros produtos de áreas queimadas (como por exemplo os erros de comissão em áreas agrícolas e infraestrutura urbana e erros de omissão em áreas pequenas). No segundo capítulo, nós combinamos o nosso produto de áreas queimadas com os mapas anuais de uso e cobertura do solo (MapBiomas) e buscamos entender, como subsídio à conservação, os padrões temporais e

espaciais da ocorrência de fogo no Cerrado paulista, nas Unidades Conservação e em suas Zonas de Amortecimento.

OBJETIVO GERAL

1. Determinar o regime de queimas no Cerrado do estado de São Paulo e analisar sua relação com o histórico e mudanças no uso e cobertura do solo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Desenvolver um algoritmo para mapeamento de áreas queimadas.
2. Gerar e validar um produto de áreas queimadas para o Cerrado paulista.
3. Analisar os padrões espaciais e temporais do regime de fogo do Cerrado paulista, Unidades de Conservação e Zonas de Amortecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alencar, A., Z. Shimbo, J., Lenti, F., Balzani Marques, C., Zimbres, B., Rosa, M., Arruda, V., Castro, I., Fernandes Márcico Ribeiro, J. P., Varela, V., Alencar, I., Piontekowski, V., Ribeiro, V., M. C. Bustamante, M., Eyji Sano, E., & Barroso, M. (2020). Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing*, 12(6), 924. <https://doi.org/10.3390/rs12060924>
- Archibald, S. (2016). Managing the human component of fire regimes: lessons from Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 371(1696), 20150346. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0346>
- Bastarrika, A., Alvarado, M., Artano, K., Martinez, M., Mesanza, A., Torre, L., Ramo, R., Chuvieco, E., Bastarrika, A., Alvarado, M., Artano, K., Martinez, M. P., Mesanza, A., Torre, L., Ramo, R., & Chuvieco, E. (2014). BAMS: A Tool for Supervised Burned Area Mapping Using Landsat Data. *Remote Sensing*, 6(12), 12360–12380. <https://doi.org/10.3390/rs61212360>
- Batalha, M. A. (2011). O cerrado não é um bioma. *Biota Neotropica*, 11(1), 21–24. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032011000100001>
- Bond, W. J., Woodward, F. I., & Midgley, G. F. (2004). The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytologist*, 165(2), 525–538. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x>
- Bond, William J., & Keeley, J. E. (2005). Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(7), 387–394.

<https://doi.org/10.1016/J.TREE.2005.04.025>

Conciani, D., Santos, L., Silva, T. S. F., Durigan, G., & Alvarado, S. T. (2021). Human-Climate Interactions Shape Fire Regimes in the Cerrado of São Paulo state, Brazil. *Journal for Nature Conservation*.

Coutinho, L. M. (1982). *Ecological Effects of Fire in Brazilian Cerrado* (pp. 273–291).

https://doi.org/10.1007/978-3-642-68786-0_13

Coutinho, L. M. (1990). *Fire in the Ecology of the Brazilian Cerrado* (pp. 82–105). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75395-4_6

Coutinho, Leopoldo Magno. (2006). O conceito de bioma. In *Acta Botanica Brasilica* (Vol. 20, Issue 1, pp. 13–23). <https://doi.org/10.1590/s0102-33062006000100002>

Durigan, G., & Ratter, J. A. (2016). The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. *Journal of Applied Ecology*, 53(1), 11–15. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12559>

Durigan, G., Siqueira, M. F. de, & Franco, G. A. D. C. (2007). Threats to the Cerrado remnants of the state of São Paulo, Brazil. *Scientia Agricola*, 64(4), 355–363. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000400006>

Eiten, G. (1972). The cerrado vegetation of Brazil. *The Botanical Review*, 38(2), 201–341.

<https://doi.org/10.1007/BF02859158>

Goldammer, & G., J. (1993). Historical biogeography of fire: tropical and subtropical. *Fire in the Environment : The Ecological, Atmospheric, and Climatic Importance of Vegetation Fires.*, 297–314. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10007236290/>

Goodland, R., & Pollard, R. (1973). The Brazilian Cerrado Vegetation: A Fertility Gradient. *The Journal of Ecology*, 61(1), 219. <https://doi.org/10.2307/2258929>

Hawbaker, T. J., Vanderhoof, M. K., Beal, Y. J., Takacs, J. D., Schmidt, G. L., Falgout, J. T., Williams, B., Fairaux, N. M., Caldwell, M. K., Picotte, J. J., Howard, S. M., Stitt, S., & Dwyer, J. L. (2017). Mapping burned areas using dense time-series of Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 198, 504–522. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.027>

IBGE. (2019). *Mapa de Biomas do Brasil*.

<http://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/index.php/estantes/mapas/563-mapa-de-biomas-do-brasil>

Kronka, F. J. N., Nalon, M. A., Matsukuma, C. K., Kanashiro, M. M., Ywane, M. S. S., Lima, L., Guillaumon, J. R., Barradas, A. M. F., Pavão, M., & Manetti, L. A. (2005). Monitoramento da

vegetação natural e do reflorestamento no Estado de São Paulo. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 12, 16–21.

Mistry, J. (1998). Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 22(4), 425–448.

<https://doi.org/10.1177/030913339802200401>

Oliveira, P. S., & Marquis, R. J. (2002). *The cerrados of Brazil : ecology and natural history of a neotropical savanna*. Columbia University Press. https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TXvY_kAFPU0C&oi=fnd&pg=PA159&dq=HOFFMANN,+William+A.%3B+MOREIRA,+Adriana+G.+The+role+of+fire+in+population+dynamics+of+woody+plants.+The+Cerrados+of+Brazil.+Ecology+and+Natural+History+of+a+Neotropical+Savanna,+p.+159-177,+2002.&ots=_HuLK8HL7q&sig=RjM-0dKdC1RiZYbG8xYOC47gWo4#v=onepage&q&f=false

Overbeck, G. E., Vélez-Martin, E., Scarano, F. R., Lewinsohn, T. M., Fonseca, C. R., Meyer, S. T., Müller, S. C., Ceotto, P., Dadalt, L., Durigan, G., Ganade, G., Gossner, M. M., Guadagnin, D. L., Lorenzen, K., Jacobi, C. M., Weisser, W. W., & Pillar, V. D. (2015). Conservation in Brazil needs to include non-forest ecosystems. *Diversity and Distributions*, 21(12), 1455–1460.

<https://doi.org/10.1111/ddi.12380>

Pivello, V. R. (2011). The Use of Fire in the Cerrado and Amazonian Rainforests of Brazil: Past and Present. *Fire Ecology*, 7(1), 24–39. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0701024>

Ramo, R., & Chuvieco, E. (2017). Developing a Random Forest Algorithm for MODIS Global Burned Area Classification. *Remote Sensing*, 9(11), 1193. <https://doi.org/10.3390/rs9111193>

Ramos-Neto, M. B., & Pivello, V. R. (2000). Lightning Fires in a Brazilian Savanna National Park: Rethinking Management Strategies. *Environmental Management*, 26(6), 675–684.

<https://doi.org/10.1007/s002670010124>

Simon, M. F., Grether, R., Queiroz, L. P. de, Skema, C., Pennington, R. T., & Hughes, C. E. (2009). Recent assembly of the Cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, pnas.0903410106.

<https://doi.org/10.1073/PNAS.0903410106>

Simon, M. F., & Pennington, T. (2012). Evidence for Adaptation to Fire Regimes in the Tropical Savannas of the Brazilian Cerrado. *International Journal of Plant Sciences*, 173(6), 711–723.

<https://doi.org/10.1086/665973>

Soares-Filho, B., Rajão, R., Macedo, M., Carneiro, A., Costa, W., Coe, M., Rodrigues, H., & Alencar, A. (2014). Cracking Brazil's forest code. *Science*, 344(6182), 363–364.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em termos gerais, resumimos os principais resultados e contribuições deste trabalho da seguinte forma:

1. As bibliotecas em código aberto em linguagem R, o algoritmo Random Forest e etapas de pós-processamento foram suficientes para gerar uma metodologia automatizada e reproduzível para mapeamento de áreas queimadas no Cerrado. O código fonte do projeto pode ser acessado através do link https://github.com/musx/FireGIS_SP
2. O produto de áreas queimadas gerado conseguiu atingir qualidade satisfatória para sua posterior aplicação em análises ambientais e ecológicas (79% de acurácia, 16% de omissão e 9% de comissão).
3. Apesar de satisfatório, o produto de áreas queimadas mostrou-se limitado para o correto mapeamento de cicatrizes de queimadas em áreas úmidas, havendo alta comissão nestas áreas.
4. O desenvolvimento da plataforma “FireGIS SP” para análise interativa dos resultados irá contribuir na disseminação e divulgação dos resultados para comunidade científica, gestores e demais usuários. A plataforma pode ser acessada através do link https://bit.ly/FireGIS_SP
5. A combinação entre dados de área queimada e dados de uso e cobertura do solo mostrou-se extremamente eficiente na compreensão dos regimes de queimas do Cerrado paulista.
6. O regime de queimas do Cerrado paulista é essencialmente antrópico, respondendo diretamente pelos padrões de uso e cobertura do solo nas últimas três décadas. Isto é, transições no uso da terra de pastagem para cana-de-açúcar, incentivadas principalmente por políticas públicas de crédito e subsídios ao setor sucroalcooleiro, explicam as maiores variações regionais no regime de queimas.

7. As zonas de amortecimento das Unidades de Conservação repetem o padrão geral de queimas identificado para o Cerrado paulista.
8. Considerando as Unidades de Conservação (UCs), aquelas cobertas principalmente por florestas e cerradão pouco queimaram ou nunca queimaram ao longo da série (1985-2018). Por outro lado, UCs campestres sofreram queimas de grandes proporções em intervalos de 7-8 anos e UCs com dominância de gramíneas africanas apresentaram alta frequência de fogo, potencialmente favorecendo espécies invasoras em detrimento das espécies nativas.
9. Uma vez que as UCs campestres queimam periodicamente por motivo accidental ou criminoso, faz-se necessário o delineamento de novas estratégias de manejo que viabilizem a prescrição de queimas controladas pelos gestores destas UCs como forma de promover a fragmentação do material combustível e a manutenção da biodiversidade.
10. O fogo foi muito frequente em UCs conflituosas e dominadas por gramíneas africanas. Nesse contexto, faz-se necessário a integração da comunidade local em um modelo de gestão participativa como forma de alterar a percepção de abandono, fomentar a educação ambiental e buscar alternativas viáveis e realistas de restauração para as áreas degradadas.