

Variabilidade espacial do crescimento do eucalipto em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta parcialmente atingido por incêndio

Spatial variability of eucalyptus growth in a crop-livestock-forestry integrated system partially affected by fire

Luana Selli¹, José Ricardo Macedo Pezzopane², Teresa Cristina Alves³, Alberto Carlos de Campos Bernardi⁴

¹ Especialista em Ciência de Dados e Inteligência Artificial / Engenheira Ambiental, Xrobots, São Carlos (SP), Brasil, luanaselli@hotmail.com

² Doutor, Engenheiro Agrônomo, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br

³ Doutora, Médica Veterinária, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, teresa.alves@embrapa.br

⁴ Doutor, Engenheiro Agrônomo, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi aplicar a análise espacial para dimensionar impactos de um incêndio em um sistema ILPF em São Carlos/SP. O estudo foi realizado em uma área de 12,86 ha, que compreende o sistema ILPF Produção de Leite, na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos/SP. Foram realizadas medições da altura, do diâmetro e do volume de madeira das árvores. Os dados coletados foram armazenados, tratados e interpolados em ambiente SIG. Em julho de 2020 parte do sistema de produção foi atingido por um incêndio acidental. Os dados levantados em 2021 foram comparados com dados de 2019 e 2020, criando-se um histórico de desenvolvimento da área em cenários pré e pós-incêndio. Estimou-se que o fogo causou uma perda de 10% do volume total de madeira total do sistema. Os resultados evidenciaram os impactos negativos do incêndio causou no sistema de produção integrado, e como as técnicas e ferramentas de geoprocessamento contribuíram para dimensionar os efeitos dos danos causados pelo incêndio e subsidiar a tomada de decisão no manejo dos sistemas agropecuários.

Palavras-chave: geoprocessamento; análise espacial; interpolação IDW; sistemas de produção integrados; ILPF.

ABSTRACT

This work aimed to apply spatial analysis to evaluate the fire impacts in an integrated crop-livestock-forest system (ICLFS) in São Carlos-SP. The study was carried out in an area of 12.86 ha that comprises the ICLF Dairy system, at Embrapa Pecuária Sudeste, in São Carlos/SP. Trees' height and diameter, as well as wood volume, were periodically measured. The collected data were stored, processed, and interpolated in SIG. In July 2020, part of the production system was hit by an accidental fire. The data collected in 2021 were compared with those from 2019 and 2020, creating a history of tree growth in pre- and post-fire scenarios. It was estimated that the fire caused a loss of 10% of the total wood volume in the system. The results confirmed the negative impacts caused by the fire on the ICLFS, and how the geoprocessing techniques and tools contributed to scaling the damage effects caused by the fire and subsidizing decision-making in agricultural systems management.

Keywords: geoprocessing; spatial analysis; IDW interpolation; integrated production systems; ICLFS.

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000050>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.



1 INTRODUÇÃO

No geoprocessamento, a análise espacial permite extrair e gerar novas informações e significados de dados pontuais georreferenciados originais. Essa análise é executada em um sistema de informação geográfica (SIG), que possibilita a interpolação de dados (Filippini-Alba, 2014). A interpolação espacial utiliza pontos vetoriais com valores conhecidos para estimar os valores em outros pontos desconhecidos, gerando uma superfície de toda a área ou uma camada *raster*. Existem diversos métodos de interpolação como o inverso ponderado da distância, krigagem, curvatura mínima ou *spline*, vizinho mais próximo, triangulação com interpolação linear médias móveis e polinômio local, entre outros. É essencial definir um método de interpolação adequado que otimize a estimativa dos valores desconhecidos. A técnica da ponderação pelo inverso da distância, ou *Inverse Distance Weighting* – IDW é a de interpolação mais utilizada pela fácil aplicação, baseada na distância ponderada de pontos amostrais (Tomczak, 1998; Henley, 2012). Na interpolação com o IDW, as amostras de pontos são ponderadas, de acordo com a influência de um ponto relativo a outro, e declina com a distância a partir de um ponto desconhecido estimado.

A interpretação dos mapas derivados da interpolação de dados, pelos diferentes métodos, permite a identificação de regiões em que o fenômeno em estudo é mais ou menos uniforme (Grego et al., 2014). Dessa forma, a utilização do geoprocessamento permite realizar análises climáticas, edáficas e botânicas aplicadas ao manejo de sistemas de produção agropecuário, e com isso proporcionar ganhos relacionados à redução dos impactos ambientais, economia de insumos, aumento da produtividade e qualidade dos produtos.

Os incêndios são um dos principais fatores de danos e da redução da extensão das florestas do mundo (Goldammer, 1999; Cochrane, 2003). No entanto, as consequências dos incêndios ainda não são bem compreendidas (Cochrane, 2003), e, até recentemente, trabalhos sobre o impacto de incêndios em florestas tropicais eram raros devido à sua baixa recorrência natural. No entanto, as mudanças nas ocorrências de incêndios têm sido claramente ligadas à interferência humana nesses sistemas e às mudanças climáticas (Juárez-Orozco et al., 2017).

O fogo altera de forma direta ou indireta os atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Redin et al., 2011), dependendo de sua intensidade, duração e das características do ecossistema atingido (ex. composição vegetal, topografia, clima etc.). Há também profundas alterações fisiológicas nas árvores. As lesões

causadas pelo calor de um incêndio podem desencadear uma série de complexos mecanismos que afetam a fisiologia das árvores após o evento. Bär et al. (2019) demonstraram que a necrose do câmbio e floema induzidos pelo fogo e o dano ao xilema são os principais efeitos, levando a disfunção hidráulica e má distribuição de compostos de carbono internamente nas árvores. Além disso, incêndios fora de controle podem levar a severos danos econômicos, pois podem destruir plantações, pastagens, reflorestamentos, madeira, infraestrutura (cercas, edifícios etc.) e rebanhos (Cochrane, 2003).

Os impactos causados por queimadas, em qualquer elemento da biota, dependem tanto das características do ecossistema atingido quanto do comportamento do próprio fogo, levando em conta sua velocidade, intensidade, calor liberado, distribuição e duração de temperaturas elevadas (Miranda; Klink, 1996). O objetivo deste trabalho foi aplicar a análise espacial para dimensionar impactos de um incêndio em um sistema ILPF em São Carlos/SP.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudos

Foi utilizada a unidade de referência tecnológica (URT) “Integração Lavoura-Pecuária-Floresta para produção de leite de baixo carbono (ILPF Leite)”, situada na área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos/SP. A área em estudo é subdividida em dois sistemas de produção distintos, sendo um sistema silvipastoril (IPF) e um sistema agrossilvipastoril (ILPF) com as características descritas na Tabela 1.

Um incêndio acidental atingiu parte do sistema ILPF Leite da Embrapa Pecuária Sudeste em 28/jul./2020 (Figura 1A). A ocorrência foi considerada de grandes proporções, com chamas atingindo cerca de 20 m de altura. Apesar de intensa, a ocorrência do fogo foi rápida e passageira. Assim que controlado, verificou-se que a área sul do sistema não foi afetada, porém a área norte do sistema (IPF) foi duramente afetada, acarretando a queima de 4,26 ha de terra, o equivalente a 33,13% da área total do sistema ILPF Leite e a 65,54% da área IPF (Figura 2). O sistema demonstrou boa resiliência após o incêndio. A maioria das árvores e pastagens atingidas pelo fogo rebrotou com vigor e foi possível retomar a produção animal na área após o período de chuvas (Figura 1B). Com o intuito de estimar o impacto que o incêndio gerou na região, a área de estudos foi fragmentada em três subdivisões, sendo elas: A = área sul não incendiada, B =

Tabela 1. Características do sistema ILPF Leite em São Carlos/SP.

Sistema	Tipo	Área (ha)	Plantio	Espaçamento (m)		Culturas
				Entre linhas	Entre árvores	
IPF	Silvipastoril	6,50 ha	Linha simples	20-25	3	Eucalipto Citrodora (<i>Corymbia citriodora</i> + capim paiguás (<i>Urochloa brizantha</i>)
ILPF	Agrossilvipastoril	6,36 ha	Linha simples	20-25	3	Eucalipto Citrodora (<i>Corymbia citriodora</i> + capim paiguás (<i>Urochloa brizantha</i>) + milho (<i>Zea mays</i>)

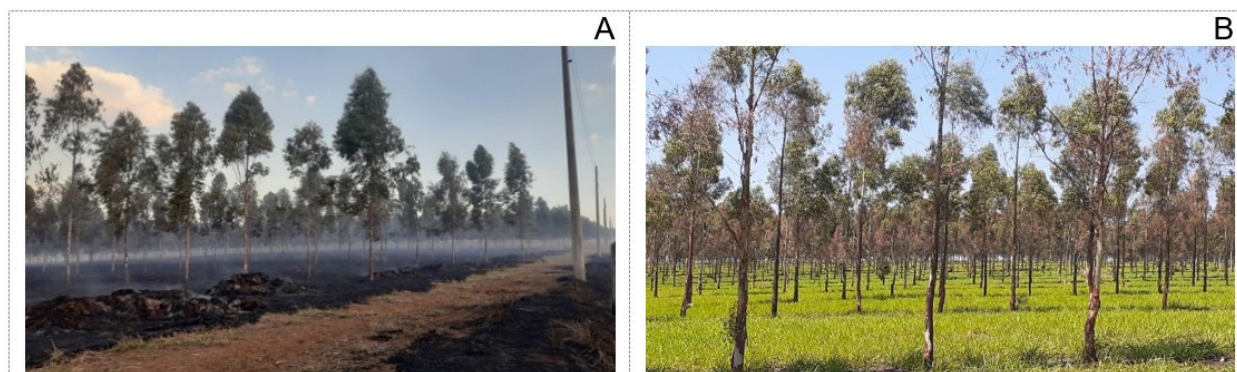


Figura 1. Imagens da área atingida do ILPF Leite (A) e em final de outubro de 2020 (B) após retorno do período das chuvas. Fotos: Gisele Rosso (A), André Novo (B).

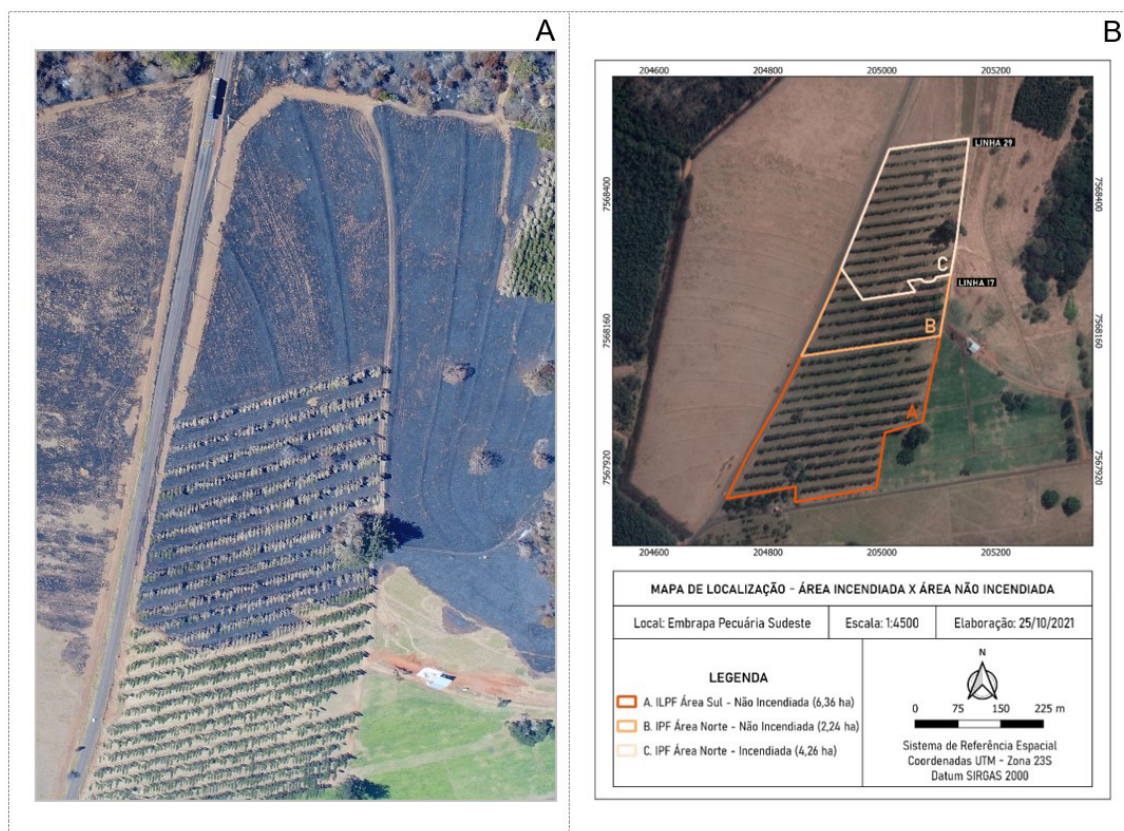


Figura 2. Imagem aérea da área atingida do ILPF Leite (A) e mapa de subdivisões do sistema ILPF Leite (B). Foto aérea: Ricardo Justiniano.

área norte não incendiada, e C = área norte incendiada (Figura 2B).

2.2 Medidas do crescimento das árvores

O sistema ILPF Leite é composto por 29 linhas de árvores, e a coleta das medidas de altura, diâmetro à altura do peito (DAP), ocorre periodicamente em 20 plantas de 20 linhas indicadas.

Os dados de altura de 400 árvores de eucalipto do sistema ILPF Leite foram coletados com o auxílio de um hipsômetro eletrônico Haglof®, em março de 2019, 2020 e 2021. A partir de uma distância conhecida do aparelho até o alvo, o equipamento calcula com precisão a altura e mostra imediatamente o resultado em seu visor interno (Oliveira et al., 2014). Os dados de DAP das árvores de eucalipto foram obtidos com fita métrica. Com o valor da medida da circunferência do tronco na altura de 1,30 m, foi possível calcular o DAP da árvore a partir da relação entre as grandezas do perímetro de uma circunferência e seu diâmetro, utilizando a Equação 1:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (1)$$

Onde, DAP = diâmetro do tronco à altura do peito (1,30 m) e CAP = circunferência à altura do peito (1,30 m).

A partir dos dados médios de altura e DAP coletados em campo, e do constante fator de forma do eucalipto (0,45), foi possível calcular o volume médio das árvores presentes no sistema ILPF Leite utilizando a Equação 2:

$$Ve = \pi \cdot \left(\frac{DAP}{2}\right)^2 \cdot h \cdot 0,45 \quad (2)$$

Onde, Ve = volume do eucalipto (m³); DAP = diâmetro do tronco (m); h = altura da árvore (m); 0,45 = fator de forma do eucalipto citriodora.

2.3 Processamento dos dados e interpolação

Os dados foram transferidos para uma planilha digital e vinculados às suas devidas coordenadas geográficas previamente coletadas em campo com GPS portátil. No software QGIS 3.16.9, foram interpolados os dados de altura, DAP e volume por meio do método *Inverse Distance Weighted* – IDW (inverso ponderado da distância). A interpolação utilizou os pontos referentes a cada bloco de árvores, que possuem valores médios de altura, DAP e volume já conhecidos da medição prévia em campo, para estimar os valores das demais árvores de eucalipto que não tiveram seus dados coletados em campo, cobrindo assim a superfície de toda a área do sistema ILPF Leite.

2.4 Estimativas de volume e balanço financeiro

O volume de madeira do sistema ILPF Leite foi estimado e calculada a perda gerada pelo incêndio que atingiu a área norte do sistema ILPF Leite. Para isso, foi calculado o valor aproximado de volume de madeira presente no sistema na última coleta de dados (maio de 2021). A partir desse valor, foi estimado o equivalente financeiro referente ao volume total. Posteriormente, foi estimado o quanto o mesmo sistema estaria rendendo nesta mesma data caso o incêndio não tivesse ocorrido. Para fazer essa estimativa, foi utilizado o valor médio de 141 árvores plantadas por hectare no sistema, o volume médio de madeira por classe e o menor preço encontrado do metro cúbico do eucalipto (R\$ 38,70), para uso em energia, conforme estabelecido por cotação do Instituto de Economia Agrícola (Instituto de Economia Agrícola, 2018).

Subtraindo o volume (m³) e o valor de madeira total presente no sistema no cenário pós-incêndio (real) do valor total estimado no cenário sem incêndio (simulado), foi possível estimar a perda de volume e financeira gerada pelo incêndio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fogo é uma reação química que libera energia na forma de calor e luz e altera a estrutura da vegetação, convertendo os combustíveis em uma série de produtos da combustão que podem permanecer no local (como carvão e cinzas) ou ser transportados do local, como os aerossóis (Cochrane, 2003). O grau com que a vegetação é impactada pelo fogo depende dos fluxos de calor incidentes nas várias partes da planta, que é resultado da intensidade da linha de fogo e do tempo de residência (Bär; Michaletz; Mayr, 2019).

3.1 Evolução da altura e DAP das árvores e do volume de madeira

Entre 2019 e 2020, embora houvesse variações no ritmo de crescimento, todas as árvores do sistema aumentaram a altura, modificando a classe de crescimento. É interessante observar que, já em 2020, antes do incêndio, a área norte do sistema (IPF) apresentava, em partes, um padrão de crescimento mais lento em comparação à área sul (ILPF). Já de 2020, antes do incêndio, para 2021, após o incêndio, as árvores não incendiadas se mantiveram nas classes mais altas de crescimento, enquanto a área incendiada sofreu uma estagnação parcial (Figura 3).

Em 2019, 68% das árvores do sistema se encontravam no intervalo de classe inicial de desenvolvimento, embora a região sul já apresentasse um desenvolvimento mais elevado quanto ao seu diâmetro

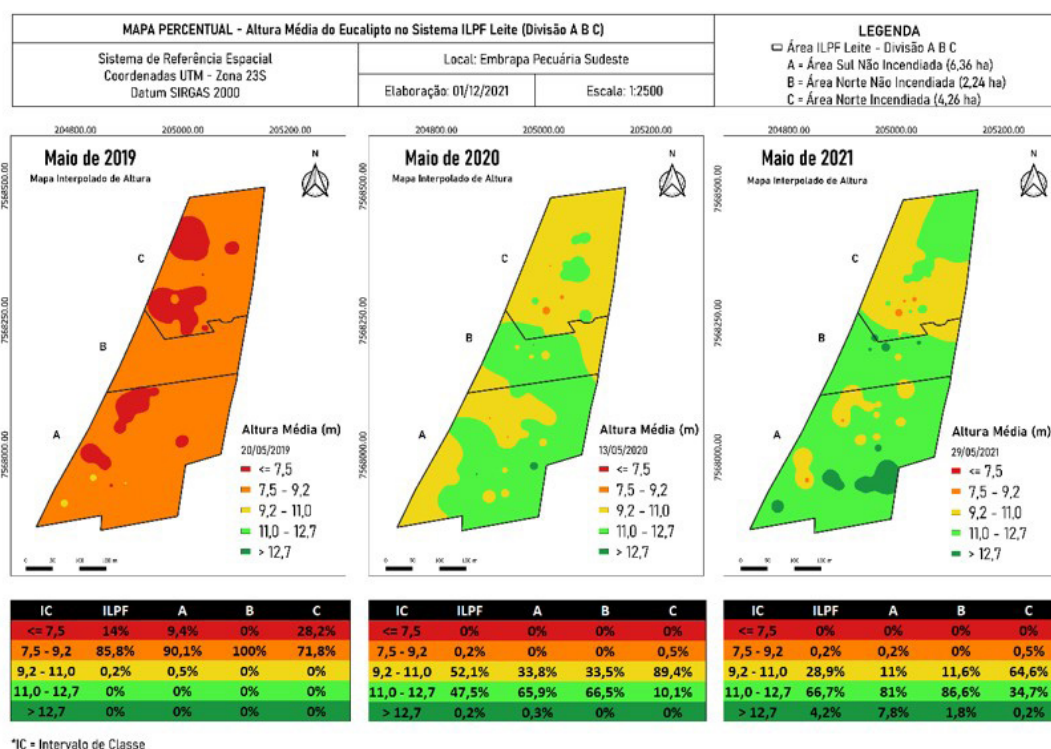


Figura 3. Mapa espacializado da altura das árvores de eucalipto Citrodora no sistema ILPF Leite em São Carlos/SP.

(Figura 4). Em 2020 foi possível observar que a diferença de desenvolvimento das árvores fora praticamente sanada, as áreas norte e sul se equipararam quanto ao tamanho de seus diâmetros. De 2020, antes do incêndio, para 2021, após o incêndio, foi possível constatar que as árvores presentes nas áreas A e B não atingidas pelo incêndio mantiveram sua taxa de desenvolvimento equiparadas, enquanto as árvores presentes na área C, afetadas pelo incêndio, não conseguiram acompanhar a taxa de desenvolvimento observada nas áreas não incendiadas e permaneceram da mesma classe que se encontravam em 2020.

Em 2019 todas as árvores do sistema ILPF Leite, sem exceções, se encontravam no intervalo de classe inicial de desenvolvimento (Figura 5). Em 2020 foi possível notar que o desenvolvimento das árvores, com relação ao seu volume, se manteve em um padrão semelhante. De 2020, antes do incêndio, para 2021, após o incêndio, foi possível verificar que o padrão de crescimento, que se mantinha semelhante até então, fora significativamente alterado. Embora a maior parte do sistema (48,8%) tenha se mantido no padrão esperado, subindo um nível de classe, a área C, afetada pelo incêndio, reduziu seu desenvolvimento e se manteve no nível de volume de madeira do ano anterior. A diminuição do crescimento provavelmente é devido ao desbalanço no suprimento interno de carboidratos (Bär; Michaletz; Mayr, 2019), uma vez que

após o fogo houve intensa perda de folhas, e as folhas novas não estão aptas a sustentar a necessidade de fotossintetizados.

Por isso, a frequência de ocorrência de queimadas pode ser crucial (Cochrane, 2003) para o crescimento e manutenção de ecossistemas naturais ou para exploração comercial. Queimadas mesmo que leves podem levar a atrasos e perda de crescimento das árvores.

3.2 Balanço financeiro

Após ser constatado que o fogo, de fato, retardou o desenvolvimento das árvores de eucalipto atingidas pelo incêndio, foi realizado um balanço de perda de volume e, consequentemente, do prejuízo financeiro causada pelo incidente (Figura 6). No cenário real, pós-incêndio, a área total do sistema ILPF Leite apresentou um volume total de 180,446 m³ de madeira de eucalipto, com potencial de rendimento de cerca de R\$ 6.983,27 com base nos dados de Instituto de Economia Agrícola (2018). No cenário simulado, no qual o incêndio não teria ocorrido, as árvores da subdivisão C mantiveram o padrão de desenvolvimento observado no restante do sistema, subindo de classe ano a ano, sem ter seu crescimento retardado. Nesse cenário, é estimado que a área total do sistema ILPF Leite apresentaria um volume total de 200,599 m³ de madeira de eucalipto, rendendo aproximadamente R\$ 7.761,64.

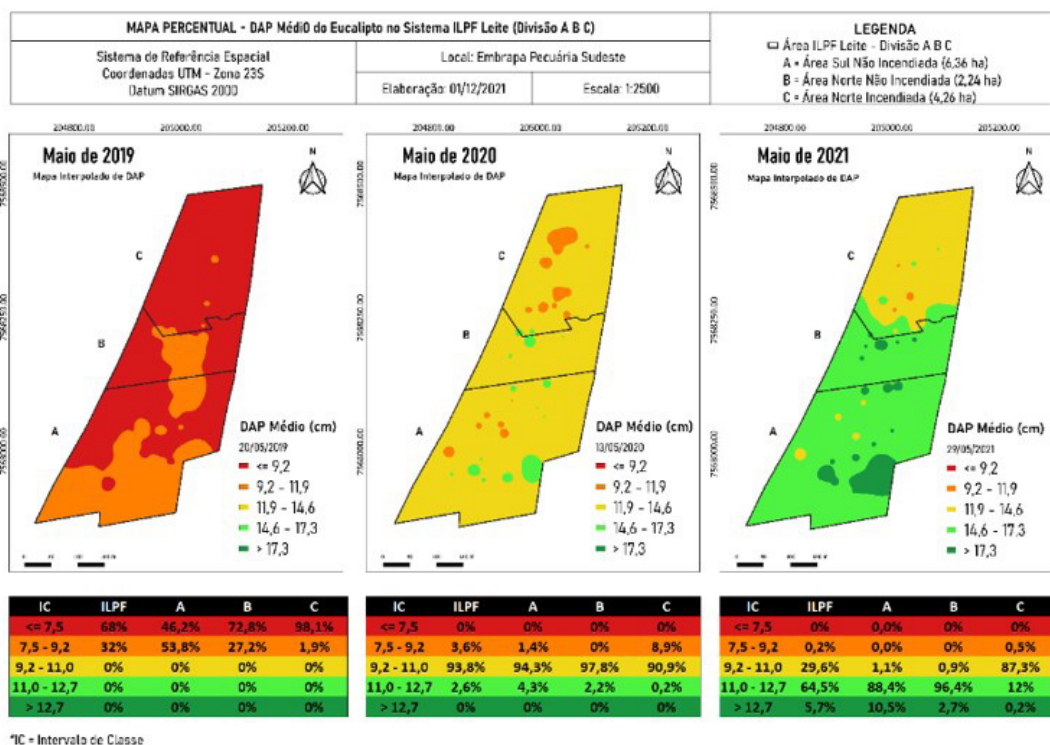


Figura 4. Mapa espacializado do diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores de eucalipto Citrodora no sistema ILPF Leite em São Carlos/SP.

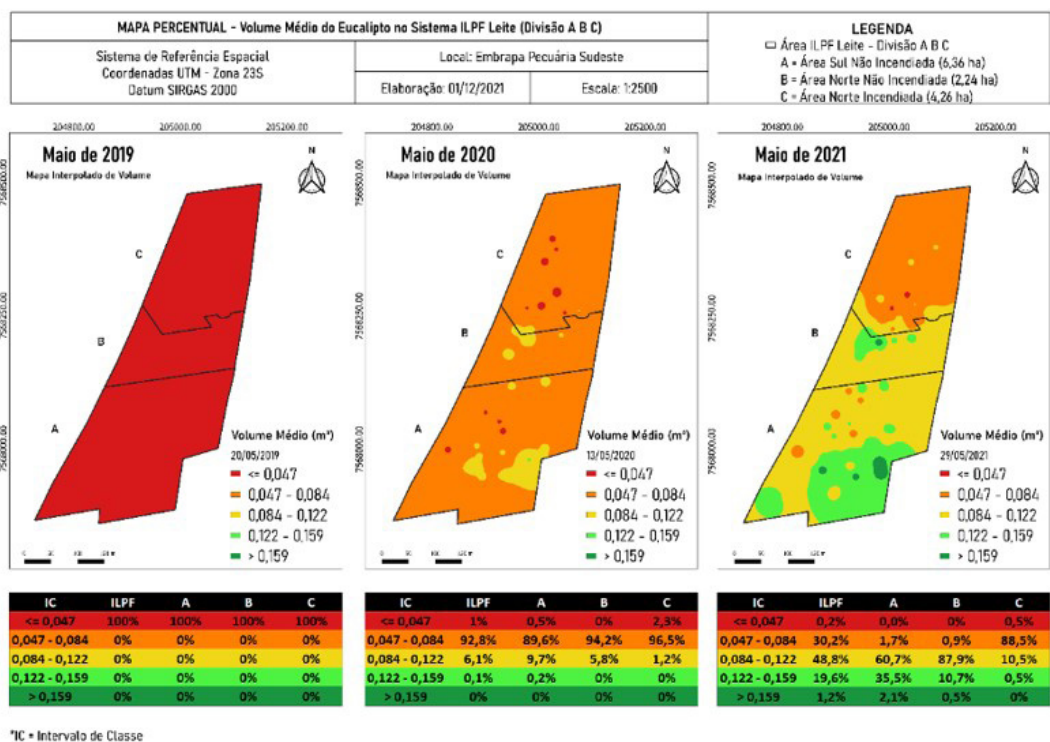


Figura 5. Mapa espacializado do volume de madeira das árvores de eucalipto Citrodora no sistema ILPF Leite em São Carlos/SP.

Comparando os dois cenários, pós-incêndio e sem incêndio, é possível estimar uma perda de 20,133 m³ de madeira no sistema, ou aproximadamente 10% do total de volume. Considerando financeiramente, hou-

ve uma perda de R\$ 778,37, em um cenário em que a madeira fosse vendida para geração de energia. Além das esperadas e óbvias perdas financeiras (Cochrane, 2003), Bär et al. (2019) alertam que pode haver efei-

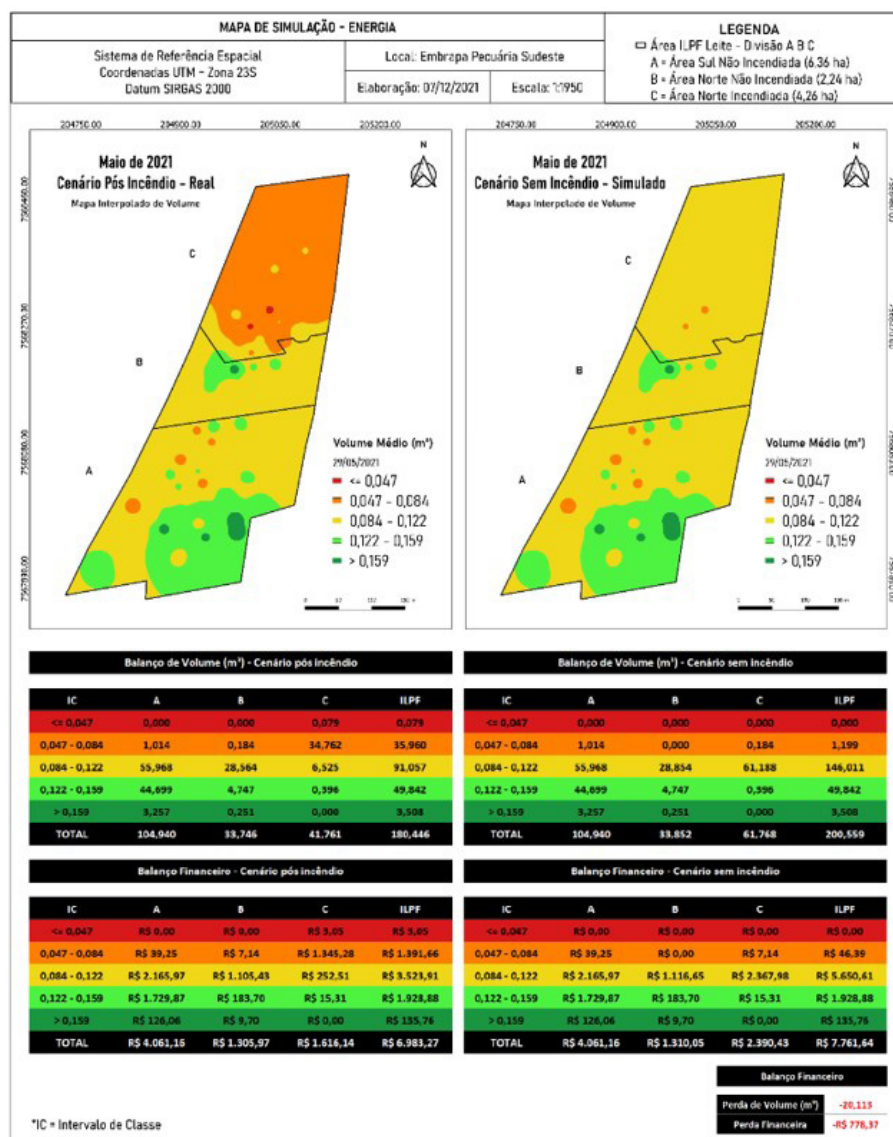


Figura 6. Mapa de balanço financeiro num cenário simulado em que a madeira das árvores de eucalipto do sistema ILPF Leite em São Carlos/SP fosse vendida para energia.

tos adversos do fogo nas árvores, ampliando os impactos negativos da seca e da ocorrência de danos por insetos, por exemplo.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que houve atraso significativo no desenvolvimento das árvores de eucalipto Citrodora na área atingida pelo incêndio, principalmente com relação ao seu DAP, altura, e consequentemente no volume, quando comparadas com as árvores localizadas nas áreas não atingidas. Em um cenário simulado em SIG, estimou-se que o fogo causou uma perda de 10% do volume total de madeira total do sistema, equivalente a 20,133 m³ de eucalipto. Financeiramente, houve uma perda

média de R\$ 778,37 no cenário em que a madeira seria vendida para uma destinação simples como para a geração de energia.

Assim, os resultados apresentados indicam que o fogo causou danos significativos no sistema de produção ILPF Leite, afetando a taxa de crescimento e desenvolvimento das árvores e acarretando perda significativa na produção de madeira do sistema.

Por fim, os resultados obtidos ressaltaram a importância do geoprocessamento aplicado à agricultura de precisão no monitoramento de sistemas de produção agropecuários, possibilitando a coleta e análise de dados georreferenciados, a interpretação de resultados, o dimensionamento de danos e subsidiando a tomada de decisões para manejo do sistema integrado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (TED n°. 21000.055745/2016-51 - CÓD. 241, e 21000.089244/2019-11 - CÓD. 325), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Embrapa (Projetos Rede Pecuária, Rede AP e Carne Carbono Neutro), à Fapesp pelo suporte financeiro necessário à condução dos trabalhos experimentais. Esta pesquisa foi desenvolvida no âmbito do Projeto Rural Sustentável – Cerrado, fruto da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o governo do Reino Unido, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e a Rede ILPF e Embrapa.

REFERÊNCIAS

- BÄR, A.; MICHALETZ, S. T.; MAYR, S. Fire effects on tree physiology. **The New Phytologist**, v. 223, n. 4, p. 1728-1741, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1111/nph.15871>.
- COCHRANE, M. A. Fire science for rainforests. **Nature**, v. 421, n. 6926, p. 913-919, 2003. DOI: <http://doi.org/10.1038/nature01437>.
- FILIPPINI ALBA, J. M. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 84-96.
- GOLDAMMER, J. G. Forests on fire. **Science**, v. 284, n. 5421, p. 1782-1783, 1999. DOI: <http://doi.org/10.1126/science.284.5421.1782a>.
- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 74-83.
- HENLEY, S. **Nonparametric geostatistics**. New York: Springer Science & Business Media, 2012. 145 p.
- INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Preço do Eucalipto**. São Paulo: IEA, 2018. Disponível em: <https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/silvicultura/preco-eucalipto>. Acesso em 10 de dez 2021.
- JUÁREZ-OROZCO, S. M.; SIEBE, C.; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, D. Causes and effects of forest fires in tropical rainforests: a bibliometric approach. **Tropical Conservation Science**, v. 10, 2017.
- MIRANDA, M. I.; KLINK, C. A. Colonização de campo sujo de cerrado com diferentes regimes de queima pela gramínea *Echinolaena inflexa* (Poaceae). In: MIRANDA, H. S.; SAITO, C. H.; DIAS, B. F. S. (eds.) **Impactos de queimadas em áreas de Cerrado e de Restinga**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1996. p. 46-52.
- OLIVEIRA, X. M.; OLIVEIRA, R. R.; RAMALHO, F. M. G.; CABACINHA, C. D.; ASSIS, A. L. Precisão e tempo de operação de alguns instrumentos para medir altura de árvores. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 2336-2344, 2014.
- REDIN, M.; SANTOS, G. F.; MIGUEL, P.; DENEGA, G. L.; LUPATINI, M.; DONEDA, A.; SOUZA, E. L. Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 381-392, 2011. DOI: <http://doi.org/10.5902/198050983243>.
- TOMCZAK, M. Spatial interpolation and its uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (IDW) -cross-validation/jackknife approach. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 2, n. 2, p. 18-30, 1998.