



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

ANTONIO HENRIQUE CORDEIRO RAMALHO

**MODELAGEM GEOTECNOLÓGICA DE PREDIÇÃO, PREVENÇÃO, DETECÇÃO E
COMBATE A INCÊNDIOS FLORESTAIS**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

ANTONIO HENRIQUE CORDEIRO RAMALHO

**MODELAGEM GEOTECNOLÓGICA DE PREDIÇÃO, PREVENÇÃO, DETECÇÃO E
COMBATE A INCÊNDIOS FLORESTAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

R165 m Ramalho, Antonio Henrique Cordeiro, 1996-
Modelagem geotecnológica de predição, prevenção, detecção e combate a incêndios florestais / Antonio Henrique Cordeiro Ramalho. - 2022.
117 f. : il.

Orientador: Nilton Cesar Fiedler.

Coorientador: Alexandre Rosa dos Santos.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Incêndios florestais - Prevenção e controle. 2. Engenharia florestal. 3. Sensoriamento remoto. 4. Proteção florestal. 5. Áreas protegidas. 6. Sistemas de Informações Geográficas. I. Fiedler, Nilton Cesar. II. Santos, Alexandre Rosa dos. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630*38

**MODELAGEM GEOTECNOLÓGICA DE PREDIÇÃO, PREVENÇÃO, DETECÇÃO E
COMBATE A INCÊNDIOS FLORESTAIS**

Antonio Henrique Cordeiro Ramalho

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 18 de julho de 2022.

Documento assinado digitalmente
gov.br REGINALDO SERGIO PEREIRA
Data: 19/07/2022 12:16:14-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

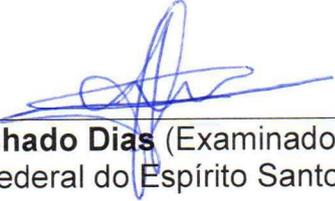
Prof. Dr. Reginaldo Sérgio Pereira (Examinador externo)
Universidade de Brasília

Documento assinado digitalmente
gov.br RONIE SILVA JUVANHOL
Data: 18/07/2022 14:31:22-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

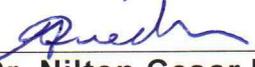
Prof. Dr. Ronie Silva Juvanhol (Examinador externo)
Universidade Federal do Piauí



Prof^a. Dr^a. Telma Machado de Oliveira Peluzio (Examinadora externa)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo



Prof. Dr. Henrique Machado Dias (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedico a Deus, aos meus pais, ao meu irmão e à minha companheira, por serem meus alicerces, minhas inspirações e meus exemplos. A vocês, meu eterno amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, por me dar suporte para vencer todos os obstáculos que encontrei no caminho e por nunca desacreditar em mim, nem mesmo quando eu o fiz.

Agradeço imensamente a Universidade Federal do Espírito Santo, em especial ao programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, por me aceitar de portas abertas e me proporcionar a oportunidade de me qualificar ainda mais para o mercado de trabalho. Aos professores por todo o conhecimento passado ao longo dessa etapa da minha vida e à paciência em ensinar. À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), pelo apoio e concessão da bolsa.

Um agradecimento especial a um dos maiores responsáveis por todo o meu crescimento profissional e pessoal: meu orientador e grande amigo Nilton Cesar Fiedler. Esse agradecimento se deve ao fato que o Nilton sempre me tratou como um filho, mostrando que carreira, profissão, status, entre outros, não significam nada quando comparados à simplicidade e humildade.

Ao meu Coorientador Alexandre Rosa dos Santos, que sempre se mostrou disposto e disponível para me auxiliar em minhas pesquisas. O professor Alexandre sempre foi um grande incentivador do meu potencial, me mostrando que eu poderia e iria alcançar meus objetivos com trabalho duro e com seriedade.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler, Prof. Dr. Henrique Machado Dias, Prof^a. Dr^a. Telma Machado de Oliveira Peluzio, Prof. Dr. Ronie Silva Juvanhol e Prof. Dr. Reginaldo Sérgio Pereira pela participação e contribuições com o meu trabalho.

Agradeço também, com toda a certeza do mundo, à minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão, que foram, continuam e continuarão sendo a minha principal fonte de força, inspiração, garra e vontade para os momentos de desespero e de glórias. Não consigo entender às vezes como pode, eu, ser premiado com uma mãe (Cida Ramalho), um pai (Antonio Cordeiro) e um irmão (Eduardo Cordeiro Ramalho) tão perfeitos. Qualquer oportunidade que eu tivesse para retornar para mais uma vida, só teria sentido se eles estivessem comigo, pois sinto um imenso orgulho de ser dessa família.

Durante os momentos mais difíceis da minha estadia em Jerônimo Monteiro, ela estava lá, e durante os momentos mais felizes, ela também estava lá, sendo assim, estendo meus agradecimentos à minha companheira Fernanda D. Maffioletti, por tudo

que fez e vem fazendo por mim. Sem ela cada um dos passos para atingir esses objetivos seriam extremamente dificultados. Estendo meus agradecimentos à minha sogra (Lú), ao meu sogro (César) e aos meus cunhados (Júlio, Nayr e Danielle), que me aceitaram como membro de suas famílias.

Ao meu amigo, parceiro de pesquisa e mentor Evandro Ferreira da Silva, que me auxiliou em todas as pesquisas de maior impacto realizadas e em minhas buscas por uma vaga no mercado de trabalho, além de estar presente nos momentos de comemorações e de dificuldade.

E finalmente, além da minha família de sangue, não posso deixar de agradecer aos meus amigos, que são a família que eu escolhi para mim. Em especial à Rodrigo Flávio, Luiz Eduardo, Leonardo Biazatti, Elayne Kátia, Marcelo Zatta, Robert Gomes, Jéssica Tetzner, Jéssica Sabrina, Antonio Thiago, Patrícia Borges, Fernanda Lucas, Mariana Aragão e Gabriel Madeira.

“Quando a vitória vem, dor é passado.”
(SANT, 2017).

RESUMO

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro. **Modelagem geotecnológica de predição, prevenção, detecção e combate a incêndios florestais**. 2022. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Nilton Cesar Fiedler. Coorientador: Alexandre Rosa dos Santos.

Os incêndios florestais são as principais ameaças ambientais, econômicas e sociais às Unidades de Conservação. Considerando o poder destrutivo desses, a compreensão dos padrões de ocorrência e a definição de técnicas de enfrentamento, são primordiais para uma gestão de riscos eficiente. Desta forma, com a presente pesquisa objetivou-se a elaboração de um modelo de predição, prevenção, detecção e combate a incêndios florestais no Parque Nacional do Caparaó e sua zona de amortecimento a partir de ferramentas geotecnológicas. Assim, foram delimitadas as áreas de maior risco de incêndios florestais, as áreas prioritárias de construção de aceiros, os locais ótimos para torres de monitoramento e de reservatórios de água para reabastecimento dos veículos e aeronaves de combate. As variáveis utilizadas foram: uso e ocupação da terra; índice de vegetação com diferença normalizada; altitude; declividade; orientação do relevo; proximidade de estradas, de áreas consolidadas e de cursos d'água; precipitação; temperatura do ar; temperatura da superfície terrestre; umidade relativa do ar; velocidade dos ventos; e déficit hídrico. As técnicas utilizadas foram: Lógica *Fuzzy*; distância euclidiana; e análise de redes. Para apoiar a modelagem de risco, procedeu-se com uma coleta de material combustível para determinação da intensidade de queima das classes de uso e ocupação da terra, que apontou a pastagem, a macega e as eucaliptocultura como as de maior risco de incêndios. Além disso, 76,70% da área de estudo é coberta pelas classes de risco de incêndios muito baixo, baixo e moderado e as classes de risco alto e muito alto concentraram-se na zona de amortecimento. As classes de prioridade de construção de aceiros foram delimitadas para proteger os recursos naturais do Parque e as áreas consolidadas na Zona de Amortecimento, resultando em 4.409,38 hectares sob as classes de prioridade alta e muito alta. Os cenários com 45 e 48 torres de monitoramento foram considerados os mais vantajosos, haja vista que permitiram uma visualização acima de 70% e custo por hectare visualizado semelhante. O melhor resultado acerca dos reservatórios de água foi a partir de aeronaves, que demandou um total de 42 reservatórios para atender toda a necessidade. Com esses resultados

pôde-se concluir que apesar de o Parque Nacional do Caparaó não apresentar riscos críticos de incêndios florestais, existe uma necessidade de medidas para evitar a propagação das chamas durante eventuais ocorrências, principalmente nas proximidades da zona de amortecimento. Assim, as áreas prioritárias para a construção de aceiros localizaram-se, majoritariamente, na zona de amortecimento. As variações de relevo da área limitam a visualização das torres, fazendo com que o número ideal seja elevado, comparado a pesquisas em áreas menos inclinadas. A implantação de reservatórios de água para apoio no combate aos incêndios por veículos terrestres não foi capaz de atender a todos os pontos de demanda, tornando, portanto, a distribuição de reservatórios para combate com aeronaves a opção mais eficiente. Por fim, concluiu-se que todas as metodologias apresentadas forneceram subsídios para a melhoria do enfrentamento aos incêndios florestais, sendo viáveis, aplicáveis, replicáveis e ajustáveis a outras áreas.

Palavras-Chave: Proteção florestal; Unidades de Conservação, Reservatórios de água, Torres de incêndios.

ABSTRACT

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro. **Geotechnological modeling for forest fire prediction, prevention, detection and fight**. 2022. Thesis (Doctor of Forest Science) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler. Co-advisor: Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos.

Forest fires are the main environmental, economic and social threats to Conservation Units. Considering their destructive power, understanding patterns of occurrence and defining coping techniques are essential for efficient risk management. Thus, the present research aimed to develop a model for predicting, preventing, detecting and fighting forest fires in the Caparaó National Park and its buffer zone using geotechnological tools. Thus, geotechnological tools were used to delimit the areas at greatest risk of forest fires, priority areas for firebreak construction, optimal locations for monitoring towers and water reservoirs for refueling combat vehicles and aircraft. The variables used were: land use and occupation; normalized difference vegetation index; altitude; slope; relief orientation; proximity to roads, to consolidated areas and to water courses; precipitation; air temperature; Land surface temperature; relative humidity; wind speed; and water deficit. The techniques used were: fuzzy logic; euclidean distance; and network analysis. To support the risk modeling, a collection of combustible material was carried out to determine the burning intensity of the land use and occupation classes, which pointed to pasture, thicket and planted forests as the ones with the highest risk of fires. In addition, 76.70% of the study area is covered by the very low, low and moderate fire risk classes and the high and very high risk classes were concentrated in the buffer zone. The firebreak construction priority classes were delimited to protect the Park's natural resources and the consolidated areas in the Buffer Zone, resulting in 4,409.38 hectares under the high and very high priority classes. The scenarios with 45 and 48 monitoring towers were considered the most advantageous, given that they allowed a visualization above 70% and a similar cost per hectare visualized. The best result regarding water reservoirs was from aircraft, which lacked a total of 42 reservoirs to meet all the demand. With these results, it was possible to conclude that although Parque do Caparaó does not present critical fire risks, there is a need for measures to prevent the spread of flames during eventual occurrences, especially in the vicinity of the buffer zone. Thus, the priority areas for the construction of firebreaks were mostly located in the buffer zone. The relief variations

in the area limit the view of the towers, making the ideal number somewhat high, compared to surveys in less inclined areas. The implementation of water reservoirs to support firefighting by land vehicles was not able to meet all demand points, thus making the distribution of reservoirs for combating with aircraft the most efficient option. Finally, it was concluded that all the methodologies presented provide subsidies for improving the fight against forest fires, being viable, applicable, replicable and adjustable to other areas.

Keywords: Forest protection; Conservation Units, Water Reservoirs, Fire Towers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Triângulo do fogo.	18
Figura 2. Algoritmo da distância euclidiana.	30
Figura 3. Mapa de localização da área de estudo.	32
Figura 4. Representação gráfica do planejamento completo de predição, prevenção, monitoramento e combate aos incêndios florestais.	33
Figura 5. Distribuição espacial das variáveis que compõem o banco de dados da presente pesquisa.	37
Figura 6. Distribuição espacial das variáveis que compõem o banco de dados da presente pesquisa.	38
Figura 7. Fluxograma de aplicação das funções de pertinência em cada uma das variáveis analisadas para o zoneamento de risco de incêndios florestais.	46
Figura 8. Fluxograma de aplicação das funções de pertinência em cada uma das variáveis analisadas para a delimitação de áreas prioritárias para construção de aceiros.	49
Figura 9. Fluxograma de aplicação das funções de pertinência em cada uma das variáveis analisadas para o zoneamento de áreas aptas para instalação de reservatórios de água.	57
Figura 10. Malha equidistante representativa da rede aeroviária hipotética sobre a área de estudo.	60
Figura 11. Influência das variáveis sobre o risco de incêndios florestais.	67
Figura 12. Influência das variáveis sobre o risco de incêndios florestais.	68
Figura 13. Risco de incêndios florestais no Parque Nacional do Caparaó e em sua zona de amortecimento, bem como distribuição espacial das classes do conjunto <i>Fuzzy</i>	72
Figura 14. Distribuição espacial das cicatrizes de incêndios florestais ao longo dos 10 anos aleatorizados para validação do modelo.	74
Figura 15. Influência das variáveis sobre a prioridade de construção de aceiros.	76
Figura 16. Classes de prioridade de construção de aceiros no Parque Nacional do Caparaó e em sua zona de amortecimento.	78
Figura 17. Áreas prioritárias para a construção de aceiros no PARNA Caparaó e na sua ZA após a exclusão das classes impróprias.	80
Figura 18. Distribuição espacial das torres de monitoramento de incêndios florestais e das respectivas áreas visualizadas nos Cenários A1 e A2 para a área de estudo.	82

Figura 19. Distribuição espacial das torres de monitoramento de incêndios florestais e das respectivas áreas visualizadas nos Cenários B1 e B2 para a área de estudo....	83
Figura 20. Influência das variáveis sobre a aptidão à instalação de reservatórios de água para combate aos incêndios florestais no PARNA Caparaó e sua zona de amortecimento.....	87
Figura 21. Zoneamento de aptidão à instalação de reservatórios de água para combate aos incêndios florestais no PARNA Caparaó e em sua ZA.....	89
Figura 22. Pontos de demanda atendidos pelos veículos de combate terrestre e pelos veículos de combate aéreo.	92
Figura 23. Distribuição espacial e a quantidade de reservatórios necessários para o atendimento da demanda de 100%, 90%, 80% e 70% através de veículos terrestres.	93
Figura 24. Distribuição espacial e a quantidade de reservatórios necessários para o atendimento da demanda de 100%, 90%, 80% e 70% através de aeronaves.	95
Figura 25. Reservatório tipo taça coluna molhada.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Municípios Abrangidos pelo Parque Nacional do Caparaó	24
Tabela 2. Influência da altitude sobre o risco de incêndios florestais.	41
Tabela 3. Influência da declividade sobre o risco de incêndios florestais.....	42
Tabela 4. Influência da orientação do relevo sobre o risco de incêndios florestais. ...	42
Tabela 5. Influência da precipitação sobre o risco de incêndios florestais.	43
Tabela 6. Influência da temperatura do ar e da superfície sobre o risco de incêndios florestais.	44
Tabela 7. Influência da velocidade do vento sobre o risco de incêndios florestais. ...	44
Tabela 8. Influência da umidade relativa do ar sobre o risco de incêndios florestais.	45
Tabela 9. Influência do déficit hídrico sobre o risco de incêndios florestais.....	45
Tabela 10. Combinação dos cenários propostos entre a distância das estradas e os tamanhos das quadrículas para a área de estudo.	53
Tabela 11. Ranking de influência das classes de UOT sobre a propensão à instalação dos reservatórios de água.....	57
Tabela 12. Configuração da tabela de atributos da malha viária em relação à velocidade média de cada via.	59
Tabela 13. Cenários de tempo de deslocamento e abastecimento dos veículos de combate.....	61
Tabela 14. Combinação dos cenários entre o tipo de combate, tempo de ataque e porcentagem de atendimento às demandas.....	63
Tabela 15. Análise de variância da intensidade de queima dos materiais combustíveis.	64
Tabela 16. Teste de médias da intensidade de queima dos materiais combustíveis.	64
Tabela 17. Ranking de influência das classes de UOT sobre o risco de incêndios florestais.	65
Tabela 18. Análise de variância das classes de risco de incêndios florestais ocorridas sob áreas de cicatrizes de incêndios.	75
Tabela 19. Teste de médias da proporção de classes de risco de incêndios florestais ocorridas sob áreas de cicatrizes de incêndios	75
Tabela 20. Proporção de área por classe de prioridade de construção de aceiros. ...	81
Tabela 21. Área visualizada por classe de risco de incêndios florestais e quantidade de torres de cada método.	84

Tabela 22. Custo de implantação e custo por área visualizada em cada cenário	86
Tabela 23. Resultados da otimização de locais ótimos para a instalação de reservatórios de água em cada um dos cenários propostos.	91
Tabela 24. Taxa de atendimento à demanda por reservatório de água.....	96
Tabela 25. Custo de implantação e custo por área atendida em cada cenário.	97

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
3.1 Incêndios Florestais.....	18
3.2 Fatores de influência sobre a propagação dos incêndios florestais	20
3.3 Unidades de Conservação	22
3.3.1 Parque Nacional do Caparaó.....	24
3.4 Incêndios florestais em Unidades de Conservação	25
3.5 Metodologias de enfrentamento aos incêndios florestais	26
3.5.1 Predição, prevenção e combate	26
3.6 Geotecnologias aplicadas ao enfrentamento dos incêndios florestais	28
3.6.1 Distância Euclidiana.....	29
3.6.2 Lógica <i>Fuzzy</i>	30
3.6.3 Análise de redes	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 Caracterização da área de estudo	32
4.2 Procedimento metodológico	33
4.3 Banco de dados.....	33
4.4 Zoneamento de risco de incêndios florestais (RIF).....	38
4.4.1 Variáveis avaliadas	38
4.4.2 Delimitação da influência de cada variável sobre o RIF	39
4.4.3 Sobreposição <i>Fuzzy</i>	46
4.4.4 Validação do modelo	46
4.5 Delimitação de áreas prioritárias para construção de aceiros	48
4.5.1 Variáveis avaliadas	48
4.5.2 Delimitação da influência de cada variável	48
4.5.3 Sobreposição <i>Fuzzy</i>	49
4.6 Delimitação dos locais ótimos para torres de monitoramento	50
4.6.1 Variáveis avaliadas	50
4.6.2 Procedimentos metodológicos.....	52
4.6.2.1 Geração de <i>quadrículas de forma sistemática na área de estudo</i> ...	52
4.6.2.2 Seleção dos <i>cumes aptos</i>	52
4.6.2.3 Seleção dos <i>cumes dentro de cada quadrícula</i>	53

4.6.2.4	<i>Seleção dos cumes de maior altitude dentro de cada quadrícula</i>	53
4.6.2.5	<i>Validação do modelo</i>	53
4.6.2.6	<i>Análise de custos</i>	54
4.7	Zoneamento de áreas aptas para instalação de reservatórios de água.....	54
4.7.1	Variáveis avaliadas	54
4.7.2	Delimitação da influência de cada variável	55
4.7.3	Sobreposição <i>Fuzzy</i>	58
4.7.4	Determinação dos locais ótimos para os reservatórios de água.....	58
4.7.4.1	<i>Análise de custos</i>	63
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1	Risco de incêndios florestais	64
5.1.1	Ranking de risco das classes de UOT.....	64
5.1.2	Análise do risco de incêndios florestais.....	66
5.2	Áreas prioritárias para a construção de aceiros.....	75
5.3	Locais ótimos para instalação de torres de monitoramento	81
5.4	Áreas aptas para instalação de reservatórios de água.....	86
5.5	Sugestões de pesquisa	98
6.	CONCLUSÕES.....	99
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

1. INTRODUÇÃO

O fogo é um fenômeno fundamental e indispensável para a existência e manutenção dos processos ecológicos de diversos ecossistemas mundiais. No entanto, com a expansão humana associada ao processo de urbanização e consequente aumento da antropização dos ambientes naturais (introdução de cultivos agroflorestais uniformes e inflamáveis, industrialização do meio rural, aumento das áreas degradadas e de pastagem) e as mudanças climáticas, a evolução do fogo para Incêndios Florestais (IF) tem se tornado cada vez mais frequente (GUO et al., 2016, 2017; FERREIRA et al., 2019; GUIMARÃES et al., 2019; NADERPOUR et al., 2019; SU et al., 2019; ROGERS et al., 2020; RAMALHO et al., 2021a).

Os IF são definidos como todos os episódios de fogo que fogem ao controle e atingem áreas com material combustível predominantemente vegetal. Esses episódios são originários de eventos naturais, como descargas elétricas (raios), ou de ações antrópicas, negligenciais ou intencionais (FIEDLER et al., 2020a). Por falta de planejamento de gestão de riscos ou de recursos, muitas vezes o que parece ser uma ocorrência simples se desdobra em grandes e devastadores incêndios que causam inúmeros danos ambientais (fragmentação florestal, perda de biodiversidade, aumento da taxa de erosão e poluição do ar), econômicos (destruição de máquinas, equipamentos e benfeitorias) e sociais (ameaças à vida e à saúde humana) (POURGHASEMI, 2016; LIMA et al., 2018; DE LA ROSA et al., 2019; NADERPOUR et al., 2019; FIEDLER et al., 2020a; OLIVEIRA et al., 2020).

Desta forma, com o intuito de proteger e preservar ambientes naturais e garantir a conservação da biodiversidade em regiões ecologicamente importantes, bem como desacelerar o crescimento constante de áreas perdidas para os incêndios florestais, as autoridades governamentais brasileiras estabeleceram políticas de criação de Unidades de Conservação (UC) em locais estratégicos (RAMALHO et al., 2021). As UC são definidas pela Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, como o espaço territorial e seus elementos, com características naturais proeminentes, com objetivos de conservar e proteger os recursos ambientais ali presentes (BRASIL, 2000).

No Brasil, existem cerca de 1.900 Unidades de Conservação (RODRIGUES; MOREIRA; FREIRE, 2018), das quais 29 situam-se no estado do Espírito Santo (ALMEIDA, 2013; IEMA, 2020). Dentre as UC presentes no Estado, um exemplo icônico, de elevado valor ecológico, ambiental e turístico, reconhecido mundialmente, é o Parque Nacional do Caparaó (PARNA Caparaó). O PARNA Caparaó está

totalmente inserido no bioma Mata Atlântica, que, por sua vez, é considerado um dos *hotspots* da biodiversidade mundial (MYERS et al., 2000), por concentrar um conjunto elevado de espécies ameaçadas e endêmicas, que vem sofrendo com a frequente e recorrente perda de habitat, além de abrigar um grande conjunto dos ecossistemas que estão entre os mais ameaçados no país (ICMBIO, 2015). O PARNA está presente tanto no estado do Espírito Santo (76,52%) como Minas Gerais (23,48%) (ICMBIO, 2015, 2020).

Apesar da inestimável importância das UCs como prestadora de serviços ecossistêmicos essenciais e proteção das espécies, os incêndios florestais, de origem antrópica, ainda são as principais causas de destruição da biodiversidade nesses ambientes (BIAZATTI et al., 2021). Desta forma, o estabelecimento de técnicas que auxiliem na compreensão dos padrões de propagação dos incêndios florestais, principalmente no que diz respeito às UCs, é fundamental para a tomada de decisões quanto ao planejamento de enfrentamento dos mesmos (PACHECO et al., 2015).

Um eficiente planejamento de combate aos incêndios florestais deve ser composto pelas seguintes fases distintas, e complementares: predição, prevenção, detecção e combate (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO MATO GROSSO, 2018). A predição diz respeito à delimitação dos possíveis locais em que pode ocorrer os incêndios através da análise das variáveis de influência presentes no ambiente (VIGANÓ et al., 2018). A prevenção é um conjunto de atividades que visa a neutralização da ocorrência e propagação das chamas. A detecção, por sua vez, pode ser entendida como o conjunto de técnicas destinado à visualização dos focos de incêndios antes que estes tornem-se ocorrências maiores. Já o combate é definido como um misto de técnicas voltadas à supressão dos incêndios através da ação em um ou mais componentes responsáveis pela propagação das chamas (FIEDLER et al., 2020b).

Diversos autores, atestam a eficiência das geotecnologias para o planejamento de enfrentamento aos incêndios florestais. Jaiswal et al. (2002), Eugenio et al. (2016a), Bui et al. (2017), Bui, Van Le, Hoangd (2018), Naderpour et al. (2019), Çolak, Sunar (2020), Ribeiro de Oliveira et al. (2020), Ramalho et al. (2021) afirmam que a predição dos IF pode ser realizada por meio dos zoneamentos de riscos de ocorrência elaborados através de ferramentas geotecnológicas. De acordo com Oliveira et al. (2020), esses zoneamentos permitem o desenvolvimento de ações preventivas, seja por meio da redução do volume de material combustível, pela instalação de sinalização dos níveis de risco, pela aplicação de palestras de conscientização

ambiental ou pela preparação de aceiros preventivos. Já outros autores, como Venturi e Antunes (2007), Assis et al. (2014), Eugenio et al. (2016b), Zeferino e Rosa (2019), Moreira, Mendes e Santos (2020) e Sakellariou et al. (2020), afirmam que as geotecnologias também podem ser utilizadas para a implantação de ações de combate aos incêndios, como a instalação de torres de monitoramento para detectar os focos de incêndios e agilizar o contato com a central e primeiro ataque, a alocação de estações de bombeiros em locais estratégicos ou a determinação da localização de aeronaves para combate.

Dentre as ferramentas presentes no universo existentes, serão utilizadas na presente pesquisa a distância euclidiana, a lógica *Fuzzy* e a análise de redes. A lógica *Fuzzy* é uma ferramenta de geoprocessamento utilizada para traduzir valores qualitativos em numéricos, inserido em um intervalo de 0 a 1, onde, quanto mais o valor da variável se aproxima de 1, maior a sua expressividade no modelo e quanto mais se aproxima de 0, menor sua expressividade (OLIVEIRA et al., 2013; GAGLIONE et al., 2019; NADERPOUR et al., 2019; BIAZATTI et al., 2021; RAMALHO et al., 2021a, 2021b).

A análise de redes, por sua vez, é definida pelo *Environmental Systems Research Institute*, como uma metodologia aplicada com o objetivo de resolver problemas de roteamento complexos, a partir de modelos de dados de rede de transporte configuráveis (ESRI, 2020). Essa metodologia pode ser utilizada, por exemplo, na delimitação de locais ótimos para a instalação de reservatórios de água para combate a incêndios florestais em função da disponibilidade viária (RAMALHO et al., 2021b).

Sendo assim, a aplicação integrada de informações técnicas, geotecnológicas e pesquisas operacionais possibilita a determinação de planejamentos de enfrentamento aos incêndios florestais, contemplando todas as etapas necessárias para tornar essas atividades eficientes. No entanto, ainda que exista uma base de dados científicos muito bem estruturada acerca das metodologias de enfrentamento aos incêndios florestais por meio das ferramentas geotecnológicas, na maior parte das vezes elas limitam-se a estudos isolados de apenas uma das etapas do enfrentamento (predição, prevenção, detecção ou combate). Desta forma, estudos que proponham a junção dessas quatro etapas e que fomentem informações completas para a construção de um plano de enfrentamento aos incêndios florestais eficiente, são de suma importância para a proteção dos ambientes naturais.

Neste sentido, a hipótese norteadora do presente estudo é de que a aplicação de geotecnologias pode ser capaz de auxiliar tomadores de decisão quanto à criação, atualização e determinação de planos de manejo e enfrentamento aos incêndios florestais de maneira rápida e eficiente.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Elaborar um modelo de predição, prevenção, detecção e combate a incêndios florestais no Parque Nacional do Caparaó e sua zona de amortecimento a partir do uso de ferramentas geotecnológicas.

2.2 Objetivos específicos

- a) Modelar as áreas mais susceptíveis à ocorrência de incêndios florestais;
- b) Definir as áreas prioritárias de construção de aceiros para prevenção de incêndios florestais;
- c) Indicar os locais estratégicos para construção de torres de monitoramento para detecção de incêndios florestais; e
- d) Modelar a localização ótima para alocação de reservatórios de água para reabastecimento dos veículos terrestres e aeronaves de combate aos incêndios florestais.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Incêndios Florestais

Para estabelecer uma definição precisa para os Incêndios Florestais (IF), é importante salientar que existe diferença entre “fogo”, “queimada” e “incêndio florestal”. Essa diferenciação é necessária para o pleno entendimento das diversas variáveis que influem na ignição, propagação dos diferentes tipos de incêndios florestais. Dessa forma, seguem as definições:

- a) Fogo:** Fenômeno que decorre da combinação entre uma fonte de oxigênio, uma fonte de calor (energia) e uma fonte de combustível em condições de queima, que culmina na liberação de luz, calor e habitualmente chama (GRIEBELER et al., 2020). A Figura 1 é uma forma didática de explicar que os três elementos (energia – calor, combustível e oxigênio) precisam atuar de maneira conjunta para que o fogo ocorra (BARRADAS et al., 2020; SANT’ANNA et al., 2020).

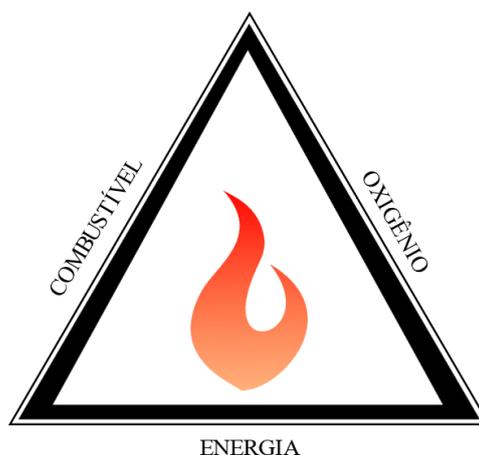


Figura 1. Triângulo do fogo.

Fonte: Sant’Anna et al. (2020).

- b) Queimada:** Esse termo é utilizado para caracterizar a utilização do fogo de maneira controlada, autorizada e com objetivos pré-estabelecidos, atuando como fator de produção ou de manejo (SANTOS; SOARES; BATISTA, 2006). Normalmente essa técnica é empregada para abertura de novas áreas de cultivo, redução do material combustível, controle de pragas e doenças e manejo da vegetação (RAMALHO; MENEZES, 2020). No entanto, ainda que essas práticas necessitem de planejamento prévio e fiscalização, por vezes fogem ao controle e atingem áreas que não faziam parte do plano, podendo evoluir para incêndios florestais (PELUZIO et al., 2020).

c) Incêndios florestais (IF): Todo evento de fogo que incide em áreas cobertas por vegetação, proveniente de ações antrópicas ou naturais, que foge ao controle (FIEDLER et al., 2020a; RAMALHO et al., 2021a). Os IF são eventos periodicamente recorrentes no mundo e são considerados como o maior fator de degradação de ecossistemas naturais, devido ao seu poder destrutivo e dificuldade de controle (SARI, 2021). Apesar do potencial de destruição dos incêndios florestais, em ecossistemas que apresentam resistência, resiliência ou dependência do fogo, dentro de certos limites, esses episódios são de suma importância para a preservação e manutenção da biodiversidade, devido às características adaptativas desenvolvidas pelas espécies que compõem o ambiente (RAMALHO; MENEZES, 2020; SOARES, 2000).

Nota-se, a partir das definições propostas, que quando utilizado de maneira correta, o fogo pode apresentar significativos benefícios tanto aos produtores rurais, através da queima controlada, quanto a determinados ecossistemas naturais (RAMALHO; MENEZES, 2020). No entanto, o cenário de destruição causado pelos incêndios florestais é cada vez mais nítido e preocupante (TORRES et al., 2017).

Esses eventos podem fomentar diversos danos ambientais e sociais (NADERPOUR et al., 2019), como fragmentação florestal, perda de biodiversidade, aumento da taxa de erosão e poluição do ar, destruição de máquinas, equipamentos e benfeitorias, e ameaça à vida e à saúde humana (POURGHASEMI, 2016; BUI et al., 2017; LIMA et al., 2018; DE LA ROSA et al., 2019; NADERPOUR et al., 2019; FIEDLER et al., 2020a; OLIVEIRA et al., 2020). Tais danos, são causados principalmente pelo considerável potencial destrutivo dos IF (RAMALHO et al., 2021a), pela complexidade de combate e pelas peculiaridades em cada área de ocorrência (GOBBO et al., 2016).

Desta forma, é indispensável uma base de dados sólida acerca dos incêndios florestais, que traduzam informações em estudos de causas, de periodicidade e de locais passíveis de ocorrência, para redução dos danos potenciais (CANZIAN et al., 2020). Fiedler et al. (2020c), atestam que a ausência de informações precisas pode culminar em dois extremos: gastos exacerbados ou insuficientes com proteção, em relação ao potencial de danos das ocorrências.

Dentre os dados a serem levados em conta durante a elaboração do banco de dados de ocorrência dos IF, destacam-se: a causa, a época de ocorrência, o tipo de vegetação atingida, a localização geográfica, o tamanho da área atingida e os dados

meteorológicos durante a ocorrência (velocidade do vento, precipitação, temperatura) (FIEDLER et al., 2020c). Os gestores florestais devem coletar esses dados e organizarem em um documento denominado Registro de Ocorrência de Incêndios (ROI's), para que sejam traçados métodos e técnicas de enfrentamento a possíveis ocorrências futuras (CANZIAN et al., 2020).

As informações contidas nos ROI's têm importância principalmente na etapa de prevenção dos incêndios, pois permitem o direcionamento de recursos para a criação de medidas mitigadoras (FIEDLER et al., 2020c). De acordo com Nascimento e Senna (2020), na maioria das vezes, as causas dos incêndios florestais são de origem antrópica, configurando situações de crime ou negligência.

As ocorrências advindas de atividades humanas podem ser iniciadas a partir de queima de lixo, fogueiras ou pontas de cigarros mal apagadas (OLAWOYIN, 2018), perda de controle do fogo durante a queima controlada (SOARES, 1988), faíscas geradas pelo contato de materiais de ferro em ferrovias (FIEDLER et al., 2020c), soltura de balões (AXIMOFF; MENNA BARRETO; KURTZ, 2020), fogos de artifício (KOPROSKI; BATISTA; SOARES, 2004), entre outros. Apesar de ocorrer em menor proporção, os incêndios de origem natural também existem, e são desencadeados principalmente por descargas elétricas (raios) (CANZIAN et al., 2020).

Ainda sobre os danos causados pelos IF, de acordo com Koproski et al. (2011) e Torres et al. (2017b), são os principais agentes de destruição da biodiversidade das Unidades de Conservação brasileiras. As principais causas de ocorrência de IF nessas áreas protegidas são os conflitos de interesse com a população local, o uso incorreto do fogo para renovação de pastagens e limpeza de área para novos cultivos agroflorestais em propriedades adjacentes (PEREIRA; FIEDLER; MEDEIROS, 2004) e vandalismo ou negligência durante atividades de recreação nas unidades.

3.2 Fatores de influência sobre a propagação dos incêndios florestais

O conhecimento dos fatores que influenciam a ignição e propagação dos incêndios florestais é extremamente importante para a delimitação dos planos de minimização de danos (SANT'ANNA; FIEDLER; RAMALHO, 2020). As variáveis de influência sobre os riscos de ocorrência de incêndios podem ser divididas em biológicas (uso e ocupação da terra), topográficas (altitude, declividade e orientação do relevo), socioeconômicas (proximidade de estradas e de assentamentos) e meteorológicas (precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos) (JUVANHOL; FIEDLER; SANTOS, 2015; AJIN et al., 2016; EUGENIO et al.,

2016a; POURGHASEMI, 2016; PRUDENTE, 2016; SOARES NETO et al., 2016; SURYABHAGAVAN; ALEMU; BALAKRISHNAN, 2016; WHITE; WHITE; RIBEIRO, 2016; TORRES et al., 2017; YOU et al., 2017; SANTOS; SOUTO; SOUTO, 2018; MOTA et al., 2019; NADERPOUR et al., 2019; ZEFERINO; ROSA, 2019; CANZIAN et al., 2020; ÇOLAK; SUNAR, 2020; JOHNSTON et al., 2020; LOISELLE et al., 2020; MOREIRA; MENDES; OLIVEIRA et al., 2020; PELUZIO et al., 2020; SANTOS, 2020; BIAZATTI et al., 2021; RAMALHO et al., 2021b; SARI, 2021).

De acordo com Ramalho (2020), o Uso e Ocupação da Terra (UOT) é uma variável que indica os tipos, padrões e distribuição geográfica de classes de cobertura terrestre. Desta forma, a partir do UOT é possível delimitar o tipo de material combustível presente em cada porção da área de interesse.

Cada tipologia florestal, ou combinação, produz material combustível (qualquer material orgânico, vivo ou morto, derivado de ambientes cobertos por vegetação, capaz de entrar em ignição) (SANT'ANNA; FIEDLER; RAMALHO, 2020), variando o tipo, a quantidade, o tamanho, a umidade, a posição e o arranjo (PRUDENTE, 2016). Assim, o tipo de cobertura florestal influencia diretamente a propagação do fogo, sendo classificado como uma variável indispensável para o entendimento dos padrões e possibilidades de ocorrência e propagação dos incêndios florestais (SANT'ANNA; FIEDLER; RAMALHO, 2020).

As variáveis topográficas também exercem influência sobre a propagação dos incêndios florestais, devido à sua capacidade de alterar o clima e por vezes a composição vegetal (PRUDENTE, 2016). De acordo com Biazatti et al. (2021), a propagação dos incêndios é mais rápida em aclives e mais lenta em declives. Isso ocorre porque, em aclives, a condição do terreno faz com que as chamas entrem em contato com o material combustível que se encontra à frente da linha de fogo, fazendo com que a velocidade de propagação seja potencializada.

A altitude também influi sobre as características dos incêndios, devido ao fato que essa variável tem influência sobre a proporção de oxigênio do ar, na temperatura e na velocidade do vento (EUGENIO et al., 2016a). Para Prudente (2016), em altitudes elevadas, o ar se apresenta mais rarefeito e as temperaturas mais baixas, tornando essas regiões menos susceptíveis à ocorrência e propagação de incêndios florestais. Torres et al. (2016c) explicam que as variações nas quantidades de radiação solar, velocidade e quantidade de ventos que ocorrem em diferentes faces de exposição do terreno fazem com que a orientação do relevo se torne uma variável importante sobre o início dos incêndios florestais.

De acordo com Fiedler et al. (2020c), a principal causa dos incêndios florestais no mundo são as atividades antrópicas. Sendo assim, a proximidade das áreas protegidas com áreas antropizadas (malha viária, centros urbanos, propriedades rurais e áreas industriais) resulta em uma maior propensão à ocorrência de incêndios, devido à interferência contínua de atividades humanas (SURYABHAGAVAN; ALEMU; BALAKRISHNAN, 2016; SARI, 2021).

As variáveis climáticas (precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento) estão relacionados à taxa de probabilidade à ocorrência do fogo (PRUDENTE, 2016) devido à sua influência sobre a umidade e secagem dos tipos de materiais combustíveis (SARI, 2021). Temperaturas elevadas e ventos muito frequentes aumentam a evapotranspiração e a velocidade de secagem da vegetação, tornando os ambientes mais susceptíveis à ocorrência de incêndios florestais (BONORA et al., 2013; AMRAOUI et al., 2015). A precipitação e a umidade relativa do ar, assim como a temperatura, tem influência sobre a umidade do material combustível, apresentando então uma relação inversamente proporcional à probabilidade de ocorrência de incêndios (RAMALHO et al., 2021a; SARI, 2021)

3.3 Unidades de Conservação

De acordo com a Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), as Unidades de Conservação (UC) são definidas como:

Espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção. (BRASIL, 2000).

Desta forma, pode se dizer que as UC são áreas destinadas à proteção dos ambientes de grande relevância ecológica, com fauna e flora singulares e com mínima interferência antrópica (BIAZATTI et al., 2021). Por meio do SNUC, foram instituídos dois grandes grupos de classificação das unidades de conservação: Unidades de Proteção Integral (Estações Ecológicas, Reservas Biológicas, Parques Nacionais, Monumentos Naturais e Refúgios da Vida Silvestre); e Unidades de Uso Sustentável (Área de Proteção Ambiental, Área de Relevante Interesse Ecológico, Floresta

Nacional, Reserva Extrativista, Reserva de Fauna, Reserva de Desenvolvimento Sustentável e Reserva Particular do Patrimônio Natural) (BRASIL, 2000).

O SNUC deixa claro quais são os objetivos de cada um dos grupos de classificação, quando no Artigo 7º, parágrafos 1º e 2º, afirma que as Unidades de Proteção Integral visam a preservação da natureza, permitindo apenas o uso indireto dos seus recursos naturais e que as Unidades de Uso Sustentável almejam a compatibilização da conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais (BRASIL, 2000).

A presente pesquisa foi realizada em uma Unidade de proteção Integral, o Parque Nacional do Caparaó. De acordo com a Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, os Parques Nacionais (PARNA) são unidades de domínio público que objetivam a preservação de ecossistemas naturais caracterizados por sua grande relevância ecológica e beleza cênica, permitindo a realização de pesquisas científicas, atividades educacionais, interpretação ambiental, recreação e turismo ecológico, com autorização prévia. Essas unidades podem ser também denominadas como Parques Municipais ou Estaduais, a depender do órgão administrativo responsável (BRASIL, 2000).

Além da definição de Unidades de Conservação propriamente dita, é importante ter em mente o conceito de Zona de Amortecimento (ZA). De acordo com a legislação, as zonas de amortecimento são as áreas que circundam uma unidade de conservação (com exceção da APA e da RPPN), com o objetivo de, como o próprio nome diz, amortecer os impactos negativos sobre a unidade, mediante o estabelecimento de normas e restrições específicas para interferências antrópicas (BRASIL, 2000).

Preferencialmente, a zona de amortecimento deve ser estabelecida pelos órgãos responsáveis e seus limites indicados claramente no plano de manejo da UC. No entanto, quando esses limites não estão delimitados no plano, a legislação sugere que seja considerada uma faixa de três quilômetros a partir do limite da UC como sendo a ZA (CONAMA, 2010).

Os autores Moraes, Mello e Toppa (2015), elucidam que a implementação e manutenção correta de zonas de amortecimento tem influência direta sobre a redução ou erradicação do isolamento de espécies nativas presentes no interior da UC, da extinção das espécies, da perda de diversidade biológica, da fragmentação e do consequente efeito de borda.

3.3.1 Parque Nacional do Caparaó

O Parque Nacional do Caparaó (PARNA CAPARAÓ) é uma Unidade de Conservação de Proteção Integral, instituído pelo Decreto Federal nº 50.646, no ano de 1961, mundialmente importante por abrigar um remanescente de um dos ecossistemas mais ameaçados do mundo, o bioma Mata Atlântica. O PARNA CAPARAÓ está inserido na Mata Atlântica, que, por sua vez, é considerada um dos *hotspots* da biodiversidade mundial (ICMBIO, 2015), ou seja, é uma área com concentrações excepcionais de espécies endêmicas que vem sofrendo com a frequente e recorrente perda de habitat (MYERS et al., 2000).

O PARNA CAPARAÓ abrange uma área de 31.853,12 hectares, dividida entre municípios localizados nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo (ICMBIO, 2015) (Tabela 1).

Tabela 1. Municípios Abrangidos pelo Parque Nacional do Caparaó

Estado	Cobertura do PARNA CAPARAÓ (%)	Município	Cobertura do PARNA CAPARAÓ (%)
Minas Gerais (MG)	20,6	Alto Caparaó	14,12
		Alto Jequitibá	1,12
		Caparaó	0,28
		Espera Feliz	5,04
Espírito Santo (ES)	79,4	Divino de São Lourenço	12,33
		Dores do Rio Preto	7,34
		Ibitirama	24,34
		Irupi	1,18
		Iúna	34,26

Fonte: ICMBio (2015).

De acordo com o Plano de Manejo do Parque, os ecossistemas presentes na área são de floresta ombrófila densa, floresta estacional semidecidual montana, campos de altitude e ecossistemas de transição (entre floresta e campo ou entre floresta e pasto). O PARNA CAPARAÓ apresenta duas estações bem definidas: verão chuvoso (novembro a março); e inverno seco (abril a outubro) (ICMBIO, 2015).

As temperaturas da região são relativamente amenas (entre 19 °C e 22 °C), a umidade relativa do ar encontra-se, normalmente, superior a 70% (ICMBIO, 2015). No

âmbito da geologia, a UC situa-se sobre o Maciço do Caparaó (Unidade Geomorfológica), integrando uma ampla cadeia de dobramentos da Província Mantiqueira adjacente à costa Atlântica (ICMBIO, 2015). A região apresenta altitudes elevadas, com relevo fortemente acidentado e classes de solo representadas por: latossolos, nitossolos vermelhos, argissolos vermelho-amarelos, neossolos litólicos e cambissolos (ICMBIO, 2015). Em se tratando de hidrografia, pode se dizer que a região do PARNA CAPARAÓ é praticamente toda influenciada pelos cursos d'água que nascem no seu interior (ICMBIO, 2015).

Em relação à cobertura vegetal, o Parque encontra-se totalmente inserido no bioma Mata Atlântica, e varia a sua cobertura entre as florestas (florestas ciliares, a montana densa e montana aberta), os campos de altitude (sobre afloramentos rochosos com vegetação esparsa ou com vegetação arbórea, rocha nua e brejos de altitude), as áreas de transição natural (entre floresta e campo e entre floresta e pasto) e as áreas antropizadas (propriedades urbanas ou rurais, vias de acesso e áreas de uso múltiplo) (ICMBIO, 2015).

O PARNA Caparaó tem em seu plano de manejo a definição detalhada tanto dos limites quanto dos objetivos da Zona de Amortecimento. O objetivo é “ampliar a escala da conservação por meio do ordenamento e da proposição de diretrizes para o desenvolvimento sustentável no entorno do PARNA Caparaó” (ICMBIO, 2015, p. 499).

3.4 Incêndios florestais em Unidades de Conservação

Ainda que a criação de Unidades de Conservação se configurem como uma medida eficiente de manutenção e conservação da biodiversidade dos biomas pelo mundo (SANTOS; SOUTO; SOUTO, 2018), nem mesmo as legislações impostas acerca da proteção dessas áreas têm sido suficientes (TORRES et al., 2016a; BIAZATTI et al., 2021). As UC vêm sofrendo, ao longo dos anos, com vários eventos antrópicos e/ou naturais que influenciam diretamente na sua diversidade e riqueza biológica dos ecossistemas, principalmente em decorrência dos desmatamentos e dos incêndios florestais (ALVES; MATRICARDI; PEREIRA, 2013).

Para Medeiros e Fiedler (2004), as principais causas de incêndios florestais em Unidades de Conservação são: falta de preparo durante a realização de queima controlada, fogueiras de acampamentos mal apagadas, pontas de cigarros acesas, incendiários, caça, soltura de balões. Como pode-se perceber, a maior parte das ocorrências de incêndios nas UC é de origem antrópica, tendo relação direta com a

ocupação de áreas adjacentes, que acaba gerando conflitos de interesses entre os proprietários e os objetivos das unidades (FAGUNDES, 2016).

Um outro fator que influi sobre as ocorrências mais severas de IF nas UCs é a falta de planejamento adequado de enfrentamento desses eventos, desde a prevenção até o combate (LIMA et al., 2018). Tais autores afirmam ainda que essa dificuldade está atrelada a diversos fatores, como a alta intercorrência das variáveis de influência sobre os IF (condições meteorológicas, ação antrópica, propagação do fogo), a imprevisibilidade do momento da próxima ocorrência e principalmente a limitação de equipamentos e recursos humanos e financeiros.

Em contrapartida, os autores Biazatti et al. (2021) comentam em sua pesquisa, que existe, no Brasil, um órgão governamental responsável pela elaboração de mecanismos emergenciais direcionados à prevenção, proteção e combate aos incêndios florestais em unidades de conservação, chamado Sistema Nacional de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais (PREVFOGO). Dentre as medidas implantadas pelo PREVFOGO, destacam-se a elaboração de campanhas educativas, a capacitação de brigadistas, o monitoramento e as pesquisas científicas sobre as ocorrências.

3.5 Metodologias de enfrentamento aos incêndios florestais

Uma eficiente maneira de evitar os danos causados pelos incêndios florestais é a implementação de planos de prevenção de ocorrência. No entanto, devido à dificuldade da predição precisa da propagação das variáveis de influência, nem sempre é possível erradicar totalmente as chances de ocorrência dos IF. Desta forma, o estabelecimento de um plano de combate eficiente torna-se vital para a sobrevivência dos ecossistemas (FIEDLER et al., 2020b).

3.5.1 Predição, prevenção e combate

O dicionário define o termo predição como o ato de afirmar que determinada situação poderá ocorrer futuramente, ou seja, é sinônimo de previsão (DICIO, 2021). Desta forma, quando se trata de IF, a predição diz respeito à um conjunto de técnicas utilizado para determinar os locais passíveis de ocorrência (SAMPAIO, 1999).

As metodologias de predição de ocorrência dos IF têm como principal objetivo o fornecimento de subsídios para a criação de medidas preventivas, bem como de combate a partir de estruturação de informações acerca da vulnerabilidade da área

de estudo. Esse compilado de dados é obtido através da análise dos fatores de influência sobre os IF, isolados e/ou combinados (FIEDLER et al., 2020d).

A preocupação com o entendimento da influência dos componentes de um determinado ambiente sobre o risco de incêndios florestais, não é recente e nem local, pelo contrário, há muitos anos já se pesquisava sobre o assunto em diversos países do mundo (VERDE, 2008). Na maior parte das vezes, o objetivo desses estudos é estabelecer um valor numérico e palpável acerca da prevenção da propagação do fogo para que assim possam ser traçadas medidas que conscientizem a população, fomentem a criação de legislações contra os IF e que auxiliem na alocação estratégica de equipes e recursos de combate (VERDE, 2008).

A partir da criação desses bancos de dados, é possível a delimitação de medidas de prevenção para evitar a ocorrência e propagação dos IF nas UC, por parte dos gestores (BATISTA; SOARES, 2012; FIEDLER et al., 2020d; TETTO). Um programa de prevenção efetivo deve ser baseado em um conjunto de dados confiável, que fomente a tomada de decisões acerca da redução dos riscos e dos investimentos desnecessários (TETTO; BATISTA; SOARES, 2012; FIEDLER et al., 2020d).

De acordo com Mariano (2016) e Fiedler et al. (2020a), as metodologias de prevenção de ocorrência IF vão desde medidas silviculturais até estratégias de conscientização da comunidade. Dentre as medidas mais utilizadas destacam-se: o zoneamento de risco de incêndios florestais (RIF), o controle das fontes de ignição e propagação (redução do material combustível, regulamentação do uso da floresta e construção de aceiros e cortinas de segurança), a educação ambiental e a implementação de medidas legais de criminalização do uso indevido do fogo (JAISWAL et al., 2002; KOPROSKI et al., 2011; TETTO; BATISTA; SOARES, 2012; EUGENIO et al., 2016a; FIEDLER et al., 2020b; BIAZATTI et al., 2021).

Contudo, apesar da importância da predição e prevenção, a falta de aprofundamento em metodologias de auxílio estratégico no combate vem sendo um desafio a ser solucionado, devido à importância da efetividade dessa etapa na redução dos danos causados pelos incêndios (FIEDLER et al., 2020b). Somada essa questão, está a viabilidade de aplicação, o impacto dos resultados no planejamento e, por fim, a transferência de tecnologia desde a elaboração da pesquisa até a aplicação e mensuração dos resultados na empresa.

Desta forma, por meio do emprego de informações do banco de dados gerado pelas etapas antecedentes e por pesquisas operacionais, interagindo de forma sinérgica, é possível realizar o planejamento otimizado da determinação de locais

estratégicos para a instalação de torres de monitoramento (VENTURI; ANTUNES, 2007; ASSIS et al., 2014; EUGENIO et al., 2016b; MOREIRA; MENDES; SANTOS, 2020) e de reservatórios de água para abastecimento dos veículos de combate (FIEDLER et al., 2020d) com base nos diferentes níveis de risco de ocorrência de incêndios e sua distribuição espacial na área de estudo, de maneira a aumentar a eficiência da atividade, haja vista que um dos maiores empecilhos durante o combate aos incêndios florestais é a baixa disponibilidade de água nas proximidades das ocorrências (CANZIAN et al., 2018; FIEDLER et al., 2020a). A associação das variáveis com as tecnologias empregadas possibilita investigar inúmeros cenários em um espaço curto de tempo e aferir nos resultados qual cenário tem mais possibilidade de ser implementado com melhor resposta ao problema (ZEFERINO; ROSA, 2019).

3.6 Geotecnologias aplicadas ao enfrentamento dos incêndios florestais

A sociedade humana vem lidando, diariamente, com a complexidade do entendimento dos padrões e constâncias do mundo, tornando as técnicas de aquisição de informações como mercadorias altamente valiosas (BLIŠŤAN; KOVANIČ; KOVANIČOVÁ, 2015). Como resultado disso, as instituições de ensino e pesquisa por todo o mundo têm focado seus esforços no desenvolvimento de habilidades e capacidades de utilizar as informações adquiridas para a resolução de problemas de maneira criativa e eficiente (DE SOUSA; SEVILLA-PAVÓN; SEIZ-ORTIZ, 2012).

É exatamente nisso que entram as chamadas geotecnologias, que de acordo com, Juvanhol, Fiedler, Santos (2015), Prudente (2016) e Fombuena (2017), são definidas como um conjunto de técnicas e tecnologias computacionais direcionados para a coleta, armazenamento, análise e interpretação de dados espaciais, relativos à superfície terrestre. Esses processos tratam de tecnologias transdisciplinares, que, por meio do processamento de dados geográficos, integra diferentes disciplinas, equipamentos, processos, dados, metodologias, tratamentos, análise e representação de informações georreferenciadas (FOMBUENA, 2017).

A utilização das geotecnologias apoia o ser humano nas tomadas de decisão quanto ao monitoramento, administração e planejamento do espaço geográfico que habitam, através da combinação de dados espaciais e não espaciais em modelos matemáticos e/ou estatísticos (SANTOS et al., 2016). Dentre as principais geotecnologias utilizadas no cenário científico, destacam-se os Sistemas de

Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento Remoto, Geoestatística, Cartografia e Geodésia (SANTOS et al., 2012; FOMBUENA, 2017).

As aplicações das técnicas intrínsecas ao universo dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) no setor florestal são infinitas, variando desde a análise dos padrões de cobertura do solo, modelos digitais de elevação, condições de malha viária, tipos de solo e clima, até a tomada de decisões em empresas (RAMALHO, 2020). Em relação ao enfrentamento dos incêndios florestais, o SIG fomenta o incremento de conhecimento acerca das relações entre as variáveis de influência sobre o risco de ocorrência dos eventos, bem como das técnicas de prevenção e combate (TORRES et al., 2016c) através da integração de variáveis e entendimento da propagação individual e das interações de cada uma no modelo (RAMALHO, 2020).

Diversos autores enaltecem metodologias geotecnológicas específicas para a compreensão dos assuntos relacionados aos incêndios florestais. Dentre esses, Eugenio et al. (2016a), Soares Neto et al. (2016), White, White e Ribeiro (2016b), Torres et al. (2017), Mota et al. (2019), Naderpour et al. (2019), Çolak, Sunar (2020) e Venkatesh, Preethi, Ramesh (2020), afirmam que a aplicação de geotecnologias é promissora para auxiliar na redução dos danos causados pelos IF. Dentre as técnicas específicas de geotecnologias, serão utilizadas na presente pesquisa a Distância euclidiana, a Lógica *Fuzzy* e a *Network Analyst*, devido ao fato que diversos autores tem atestado a sua eficiência para fins de pesquisa de enfrentamento aos incêndios florestais (BIAZATTI et al., 2021; RAMALHO et al., 2021a, 2021b).

3.6.1 Distância Euclidiana

Um dos parâmetros que mais motivam a dedicação de esforços para obter resultados intuitivamente satisfatórios durante a análise e interpretação de imagens por meio dos SIG, é a distância existente entre as células das imagens (BAJCSY e KOVAČIČ, 1989; HUTTENLOCHER, RUCKLIDGE e KLANDERMAN, 1992; SIMARD; DENKER, 1992; LI, CHEN e CHI, 2002; WANG, ZHANG e FENG, 2005). Nesse sentido, uma das metodologias empregadas na definição dessas distâncias é a Distância Euclidiana (SANTOS et al., 2017).

A distância euclidiana utiliza os preceitos do Teorema de Pitágoras para delimitar a distância real entre duas células, ou seja, a distância de origem é determinada pela hipotenusa, sendo x_{max} e y_{max} os catetos (Figura 2) (RAMALHO, 2020).

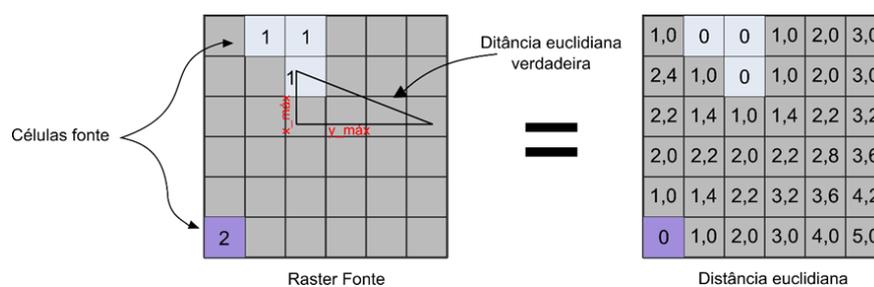


Figura 2. Algoritmo da distância euclidiana.

Fonte: Ramalho (2020).

De uma maneira simplificada, pode-se dizer que a distância euclidiana é o conjunto de técnicas que determinam a distância linear mais próxima entre o centro de duas células (RAMALHO, 2020).

3.6.2 Lógica Fuzzy

De acordo com Oliveira et al. (2013), Gaglione et al. (2019), Naderpour et al. (2019), Ramalho (2020) e Ramalho et al. (2021) a lógica *Fuzzy* é uma ferramenta de geoprocessamento utilizada para traduzir valores qualitativos em numéricos inserido em um intervalo de 0 a 1. Desta forma, a modelagem *Fuzzy* atribui graus de pertinência $\mu_A(X)$ para cada elemento inserido no intervalo de 0 a 1 (1) (RAMALHO, 2020).

$$\mu_A(X) = U \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

A lógica *Fuzzy*, determina então que a incerteza completa do conjunto foi simbolizada pelo valor “0” e a certeza absoluta pelo valor “1”. Essa metodologia permite ao usuário realizar análises livres de subjetividades, com maior criteriosidade e precisão em cenários imprecisos, ou seja, é possível elaborar estudos em diferentes áreas sem a necessidade de coletas de dados em campo (BIAZATTI et al., 2021).

Um exemplo dessa aplicação é a modelagem de risco de incêndios florestais elaborada por Ramalho et al. (2021), onde os autores definiram que os valores próximos a “0” determinariam o risco como “muito baixo” e os próximos a “1”, definiriam o risco como “muito alto”.

3.6.3 Análise de redes

Outra ferramenta presente no universo das geotecnologias que foi utilizada na presente pesquisa é a *Network Analyst*. De acordo com o Instituto de Pesquisa dos Sistemas Ambientais (ESRI) da Califórnia, essa ferramenta tem por objetivo fornecer

ao usuário a possibilidade de resolver problemas de roteamento complexos a partir de modelos de dados de rede de transporte configuráveis (ESRI, 2020).

A partir dos dados de rede de transporte, as plataformas que utilizam os SIG, como o *software* ArcGis®, viabilizam o planejamento de rotas, cálculos de tempo de viagem, localização de instalações e resolução de diversos outros problemas relacionados à rede (ESRI, 2020). Essa possibilidade de criação de diferentes cenários é consideravelmente importante para o enfrentamento aos incêndios florestais, haja vista que de acordo com Akay et al. (2012), durante um combate é vital a determinação das rotas que minimizem o tempo de ataque inicial às áreas de incêndio. O autor explica que essa necessidade de minimização se deve ao fato de que quanto maior o tempo de resposta à ocorrência menor a probabilidade de controlar os incêndios florestais.

O ESRI elucida que, a partir dos modelos e restrições existentes na ferramenta de *Network Analyst* do *software* ArcGis®, é possível ao usuário responder às seguintes questões: Qual é a forma mais rápida de chegar do ponto de demanda ao ponto de oferta?; Quais pontos de demanda estão a x minutos de um ponto de oferta?; Quais áreas de influência um ponto de oferta cobre?; Quais veículos de serviços podem atender a determinada demanda mais rapidamente? (ESRI, 2020).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo possui 45.134,21 hectares e corresponde aos limites do Parque Nacional do Caparaó e sua zona de amortecimento (ZA) definida no plano de manejo da UC. A Unidade de conservação em questão situa-se na Serra do Caparaó e está dividida em duas partes, uma no estado do Espírito Santo (79,4%) e a outra em Minas Gerais (20,6%) (ICMBIO, 2015, 2020), entre os meridianos de 41°42'0" a 41°54'0" longitude Oeste e os paralelos de 20°16'0" a 20°38'0" de latitude Sul (Figura 3).

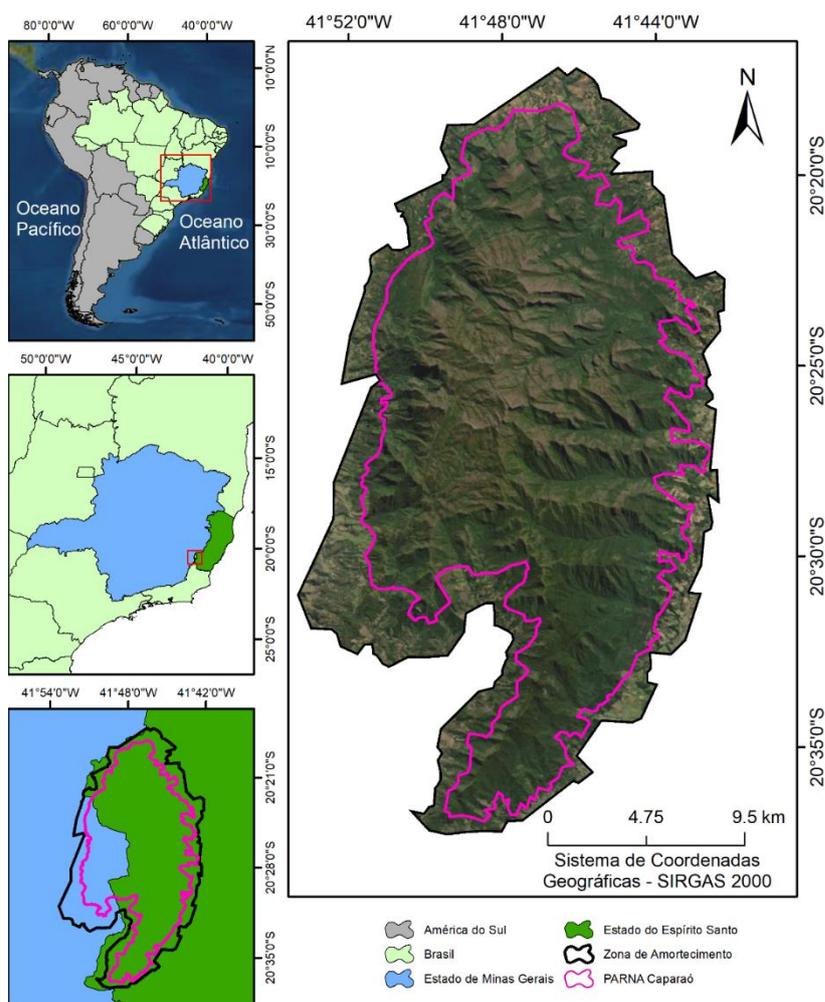


Figura 3. Mapa de localização da área de estudo.

Fonte: O autor (2022).

Conforme a classificação climática de Köppen, a área é composta pelos climas dos tipos: Cwa (subtropical com inverno seco e verão quente), Cwb (subtropical com inverno seco e verão temperado) e Cwc (subtropical com inverno seco e verão curto e fresco) (KOTTEK et al., 2006; ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual varia entre 1.000 mm e 1.500 mm (MASSINI; DO VALE, 2018). A temperatura do ar

permanece entre 19 °C e 22 °C, tendo nos locais de maiores elevações nos períodos mais frios do ano, registradas temperaturas de até 4 °C negativos. A umidade relativa do ar geralmente encontra-se acima de 70% (ICMBIO, 2015). As classes de solo da área são representadas por: latossolos, nitossolos vermelhos, argissolos vermelho-amarelos, neossolos litólicos e cambissolos (ICMBIO, 2015). Em se tratando da hidrografia, a área de estudo é praticamente toda influenciada pelos cursos d'água que nascem no seu interior (ICMBIO, 2015).

4.2 Procedimento metodológico

Para atingir o objetivo principal do presente estudo foram abordadas diversas metodologias e técnicas baseadas na utilização das geotecnologias. Portanto, a explanação metodológica desta pesquisa foi apresentada em partes diretamente interligadas entre si com um objetivo comum: Elaborar um modelo geotecnológico de predição, prevenção, detecção e combate aos incêndios florestais no Parque Nacional do Caparaó, Brasil. Para tal, serão seguidos os passos descritos na Figura 4.

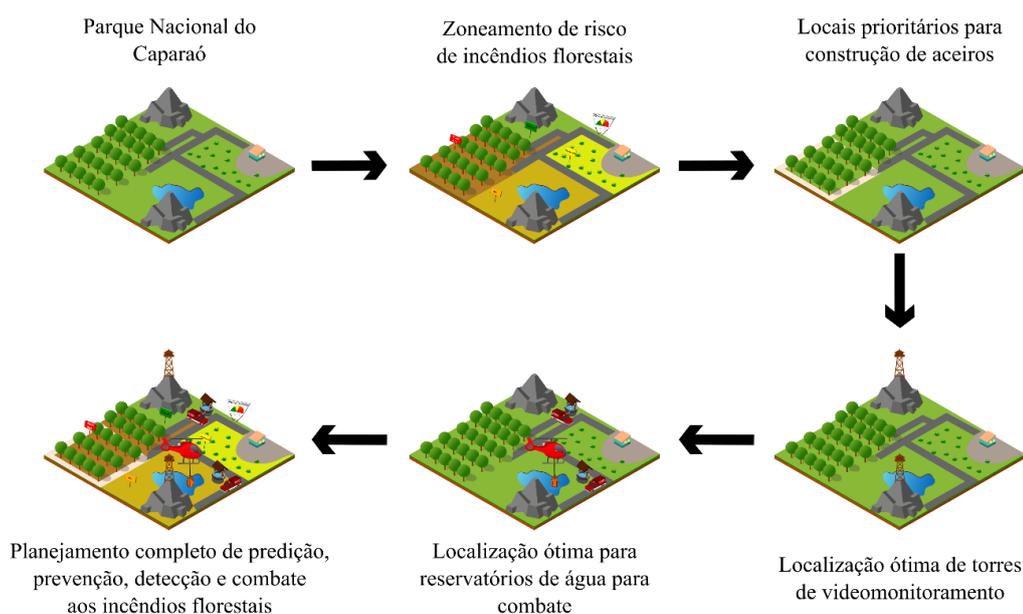


Figura 4. Representação gráfica do planejamento completo de predição, prevenção, monitoramento e combate aos incêndios florestais.

Fonte: O autor (2022).

4.3 Banco de dados

O banco de dados foi composto por variáveis utilizadas para o zoneamento de riscos de ocorrência de incêndios florestais, como a delimitação dos locais de construção dos aceiros, alocação das torres de monitoramento e dos reservatórios de água, e desta forma, foram utilizadas as seguintes variáveis:

- Biológicas: Uso e Ocupação da Terra (UOT) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI);
- Topográficas: Altitude (ALT), Declividade (DEC) e Orientação do Relevo (ORI);
- Ambientais: Proximidade do Interior do PARNA (PINT);
- Socioeconômicas: Proximidade de Estradas (PE), Proximidade de Áreas Consolidadas (PAC) e os Limites das Propriedades Rurais (LPR);
- Físicas: Proximidade de Cursos D'água (PCD); e
- Meteorológicas: Precipitação (PREC), Temperatura média do ar (TEMP), Temperatura da Superfície Terrestre (TST), Umidade Relativa do Ar (UR), Velocidade dos Ventos (VV) e Déficit Hídrico (DH).

Os arquivos de UOT, malha viária e áreas consolidadas, foram elaborados através da técnica de fotointerpretação em tela das imagens aéreas dos sensores 3/3A dos satélites Kompsat, em escala de 1:25.000, referentes aos anos de 2019 e 2020, disponibilizadas pelo Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA, 2022). A fotointerpretação foi realizada com *software* computacional ArcGis®, versão 10.3.

A fotointerpretação da malha viária seguiu o critério de características dimensionais e arranjo geográfico para classificá-las em: estradas primárias (vias, pavimentadas ou não, com largura igual ou superior a 10 metros); estradas secundárias (estradas não pavimentadas que ligam as primárias às terciárias, com largura média de até 7 metros); estradas terciárias (estradas rurais que ligam as estradas secundárias às propriedades, com largura média de até 5 metros); e estradas agrícolas (estradas no interior de plantios florestais ou agrícolas com largura igual ou inferior a 3 metros).

Para remover as inconsistências no arquivo de malha viária foi procedido com um pré-processamento por meio da ferramenta “*topology*” do ArcGis®, versão 10.3. A regra utilizada para tal foi a “não deve ter pendentes”, que determina que o final de uma linha deve tocar qualquer parte de outra linha ou qualquer parte dela mesma, evitando as estradas “sem saída” que podem comprometer o modelo.

O arquivo de malha hídrica foi adquirido através do Catálogo de Metadados da Agência Nacional de Águas (ANA, 2022a). Esse banco de dados compreende todas as massas d'água do país. Portanto foi necessário proceder com o recorte do arquivo vetorial de massa d'água através da máscara da área de estudo.

Para gerar as variáveis de proximidade de estradas e proximidade de áreas consolidadas foi aplicada a distância euclidiana nos arquivos vetoriais referentes a

cada uma. Esta metodologia define a distância em linha reta entre o centro de duas células [$D_{AB} (X_A, Y_A)$ e (X_B, Y_B)], através do teorema de Pitágoras (RAMALHO et al., 2021b).

Para a obtenção da altitude, orientação do relevo e da declividade foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE), proveniente de uma imagem matricial da missão topográfica de radar *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 30 metros, adquiridos na plataforma *Google Earth Engine*. Com o intuito de identificar e preencher as depressões espúrias, foram utilizadas as ferramentas “Sink” e “Fill” do *software ArcGis®*, versão 10.3, tendo o MDE como arquivo de entrada. A ferramenta “Slope” foi utilizada para elaborar o mapa clinográfico e a ferramenta “Aspect” para o mapa de orientação do relevo.

Os arquivos referentes às variáveis meteorológicas de temperatura média do ar, precipitação total, umidade relativa média e velocidade média do vento a 2 m acima da superfície do solo, foram extraídas do projeto “*Brazilian Daily Weather Gridded Data*” (XAVIER, 2021). Os arquivos fornecidos nessa base de dados possuem resolução espacial de 0,1 grau por 0,1 grau e são referentes à média histórica de 1980 a 2020.

Após a aquisição desse banco de dados, foi realizada a fusão de imagens pelo plugin *Orfeo toolbox*, versão 8.0.0, instalado no *software QGIS Desktop*, versão 3.16.10. Esse procedimento teve como objetivo padronizar a resolução espacial dos arquivos de entrada utilizados na presente pesquisa em 30 metros. Para tal, foram utilizadas as ferramentas *Pansharpening* (aplicação de filtro à imagem alvo da alteração da resolução espacial para dar-lhe um conteúdo espectral equivalente aos dados da imagem referência) e posteriormente a *Superimpose*, que utiliza os metadados da imagem referência para projetar a imagem de interesse.

O arquivo referente ao déficit hídrico médio anual foi elaborado a partir dos vetores fornecidos pela Agência Nacional de Águas, em escala 1:250.000, referentes à série histórica de 1997 à 2018 (ANA, 2022b). Para gerar esses arquivos, a ANA utilizou-se de séries temporais de imagens MODIS, *Sentinel* e *Landsat*.

Em relação à TST e NDVI, foram utilizadas imagens do satélite Landsat-8, obtidas na plataforma Earth Explorer do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2022), distribuídas ao longo dos últimos 9 anos (2013-2021), priorizando a aquisição de imagens com a menor interferência de nuvens possível. O período de tempo utilizado diz respeito ao ano de lançamento do Landsat-8 até a data mais recente. Essas imagens foram inseridas como entrada no *plugin RS&GIS* (BARANE;

DWARAKISH, 2022), instalado como complemento do *software* QGIS *Desktop*, versão 3.16.10. O RS&GIS executa algoritmos em dados brutos para produzir saídas como TST e NDVI, além de outras variáveis (BARANE; DWARAKISH, 2022). Desta forma, após a geração da TST dos 9 anos, procedeu-se com a aplicação da média simples desses valores afim de gerar a temperatura da superfície média para o período de referência.

O NDVI, por sua vez, foi gerado apenas para o ano de 2021, partindo do pressuposto que uma média não expressaria os valores reais das condições atuais da estrutura da vegetação. Os valores resultantes do NDVI variam de -1 a +1, sendo que quanto mais próximo de +1 maior a densidade de vegetação na área, e quanto mais próximo de -1 menor será a densidade de vegetação, significando presença de edificações ou solos expostos (COSTA, 2020).

As Figura 5 e Figura 6 apresentam a distribuição espacial das variáveis que compõem o banco de dados da presente pesquisa.

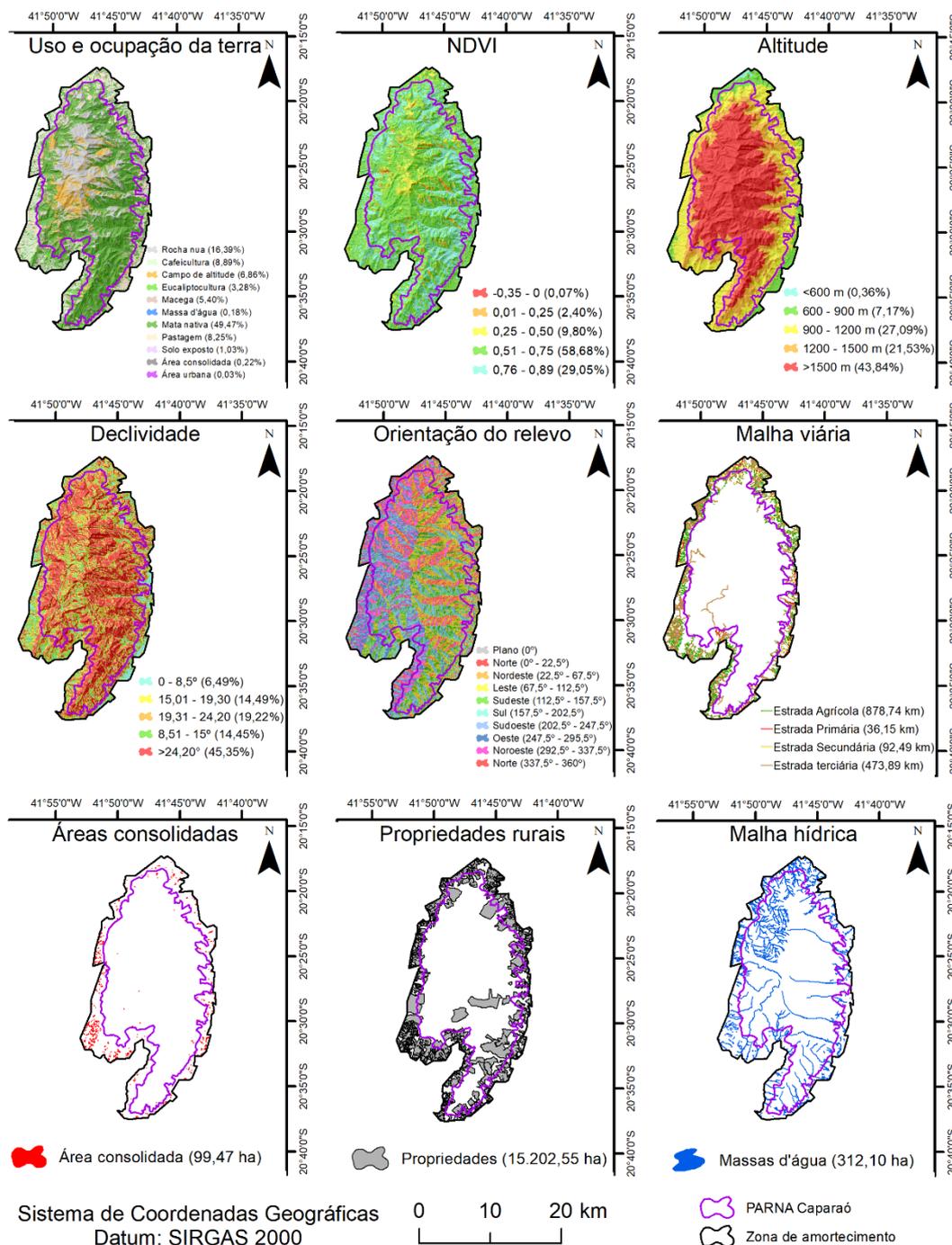


Figura 5. Distribuição espacial das variáveis que compõem o banco de dados da presente pesquisa.

Fonte: O autor (2022).

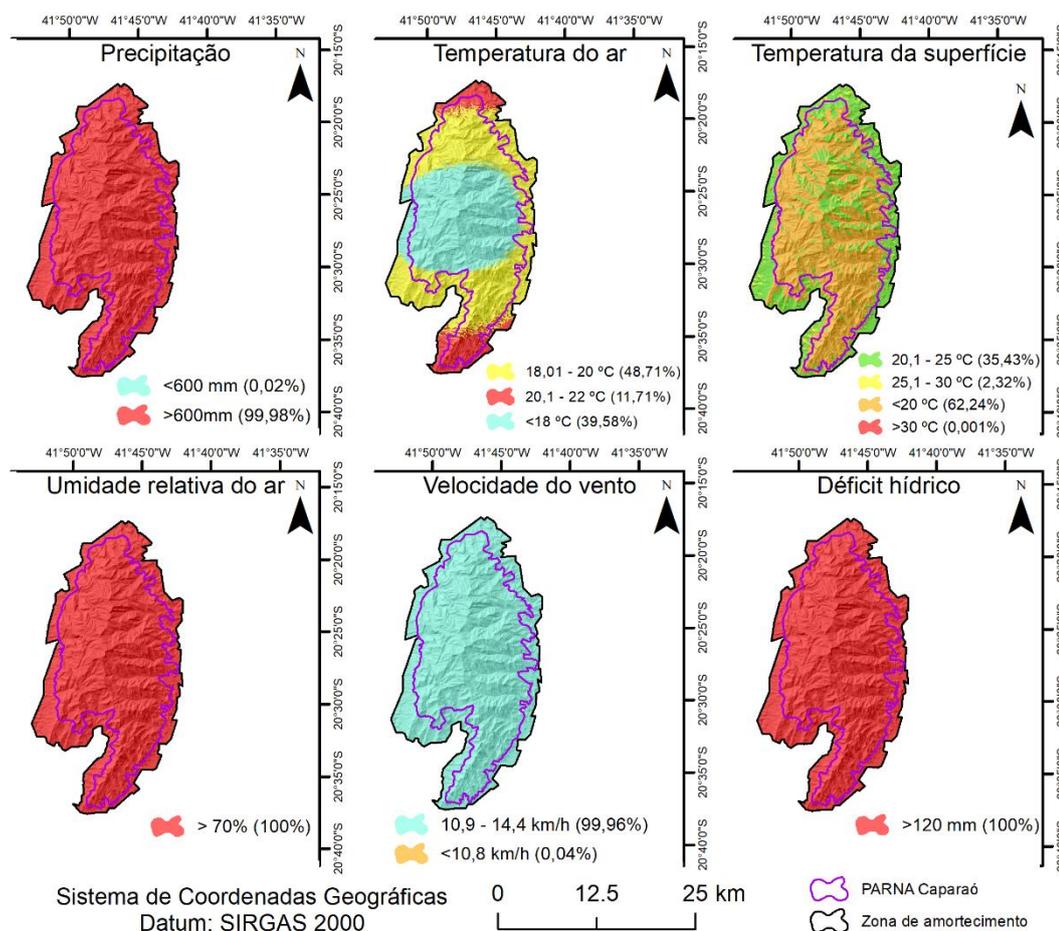


Figura 6. Distribuição espacial das variáveis que compõem o banco de dados da presente pesquisa.

Fonte: O autor (2022).

4.4 Zoneamento de risco de incêndios florestais (RIF)

Para elaboração do RIF, foi utilizada a metodologia proposta por Biazatti et al. (2021) e Ramalho et al. (2021a, 2021b), que se baseia na aplicação da modelagem *Fuzzy* sobre as variáveis de influência de risco de incêndios florestais. A seguir, serão apresentados, cronologicamente, os passos necessários para a elaboração do RIF do presente estudo.

4.4.1 Variáveis avaliadas

O banco de dados de variáveis foi composto por treze variáveis de influência sobre o risco de incêndios florestais. Para facilitar a compreensão das variáveis em questão, as mesmas foram classificadas da seguinte forma: variáveis biológicas (Uso e Ocupação da Terra – UOT; e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI) (MASELLI et al., 2003; ABEDI GHESHLAGHI; FEIZIZADEH; BLASCHKE, 2020; OLIVEIRA et al., 2020); variáveis topográficas (Altitude – ALT; Declividade –

DEC; e Orientação do relevo – ORI) (POURGHASEMI, 2016; MOTA et al., 2019; RAMALHO et al., 2021b); Socioeconômicas (Proximidade de estradas – PEST; e Proximidade de áreas consolidadas – PAC) (YOU et al., 2017; RAMALHO et al., 2021a); e Meteorológicas (Precipitação – PREC; Temperatura média do ar – TEMP; Temperatura da superfície terrestre – TST; Umidade relativa do ar – UR; Velocidade dos ventos – VV; e Déficit Hídrico – DH) (VAN MANTGEM et al., 2013; EUGENIO et al., 2016a; SANTOS; SOUTO; SOUTO, 2018; ÇOLAK; SUNAR, 2020; VENKATESH; PREETHI; RAMESH, 2020; SARI, 2021).

4.4.2 Delimitação da influência de cada variável sobre o RIF

A metodologia empregada (Lógica *Fuzzy*), traduz valores qualitativos em quantitativos pertencentes a um conjunto de valores do intervalo entre 0 e 1. Desta forma, a análise da influência de cada variável no risco de incêndios florestais, foi realizada a partir da determinação e aplicação da função de pertinência mais adequada a cada uma delas. As funções de pertinência foram aplicadas com o intuito de padronizar os valores numéricos associados a cada variável, independente da unidade que eram expressos originalmente, para obter a mesma classificação numérica dentro de um intervalo de 0 a 1, e assim prosseguir com a análise de multicritérios (ILIADIS, 2005; CASTILLO SOTO, 2012; BUI et al., 2017; ESKANDARI; MIESEL, 2017; ABEDI GHESHLAGHI; FEIZIZADEH; BLASCHKE, 2020; DE OLIVEIRA et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020; RAMALHO et al., 2021a, 2021b).

Após essa aplicação, o risco é considerado muito alto quando a variável assume valores no conjunto *Fuzzy* próximos de 1 e muito baixo quando se aproxima de 0. Desta forma, as funções de pertinência utilizadas em cada variável e a explicação do motivo da escolha destas, é apresentado a seguir.

a) Uso e ocupação da terra

De acordo com Ramalho (2020), o uso e ocupação da terra (UOT) é uma variável que influencia diretamente na propagação do fogo. Isso por que cada tipo de cobertura, ou combinação de várias, apresenta um tipo de material combustível diferente (PRUDENTE, 2016), que atua de formas distintas sobre a propensão à ocorrência de incêndios florestais. Desta forma, a função de pertinência utilizada foi a *Fuzzy* linear crescente, que traça uma reta, que se inicia pela origem, pelo ponto (0,0) e finaliza no ponto máximo da variável e do eixo *Fuzzy*.

De uma maneira simplificada, essa função determina que a classe localizada na extremidade final da reta (eixo x) representa o maior valor de risco de incêndios

florestais (mais próximos de 1 no conjunto *Fuzzy* – eixo y) e a classe que se encontra na extremidade inicial da reta (eixo x) é a com menor propensão à ocorrência de incêndios (mais próximos de 0 no conjunto *Fuzzy* – eixo y). Assim, foi elaborado um *ranking* de influência sobre o risco de incêndios florestais para cada uma das classes de UOT, com base na análise de intensidade de queima dos materiais combustíveis de cada uma das classes vegetais presentes na área. Quanto maior a intensidade de queima, maior o RIF.

Foram coletados ± 20 kg de material combustível superficial para cada uma das classes de UOT em pontos aleatorizados na área de estudo. Esses materiais foram acondicionados em estufa para secagem até atingir massa constante, em temperatura de 65 °C. Posteriormente, foram montadas três leiras de 3 m² no solo para cada um dos tipos de material combustível. Em cada uma das leiras foram distribuídos, uniformemente, 5 kg de material combustível. A linha de fogo foi iniciada no primeiro metro quadrado da leira e a mensuração dos tempos de queima foram realizadas no período em que o fogo queimava o restante da área da leira. A intensidade de queima foi determinada pela Equação 1 (BYRAM, 1959).

$$I = H \times W \times v \quad (1)$$

Onde, o I é a intensidade de queima, o H é poder calorífico do material combustível, W é a carga de combustível florestal disponível e o v é velocidade de propagação do fogo (m.s⁻¹).

Para a determinação do poder calorífico foi utilizada a bomba calorimétrica. Desta forma, após a secagem do material combustível de cada classe de UOT presente na área de estudo, 2,5 gramas desse material foram triturados e inseridos na bomba calorimétrica por 10 minutos.

Posteriormente, para a análise estatística dos valores de intensidade de queima, aplicou-se o teste de normalidade (Shapiro-Wilk) a 5% de significância e posteriormente a análise de variância (ANOVA) sobre os dados. O teste de médias aplicado foi o Tukey a 5% de probabilidade de erro utilizando o SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011).

b) Índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI)

A influência do NDVI no risco de incêndios florestais foi delimitada a partir da função de pertinência *Fuzzy linear* decrescente, pois de acordo Costa (2020), reduções de valores de NDVI estão ligadas ao aumento da probabilidade de ocorrência de fogo. Isso porque após condições de estresse hídrico, o conteúdo clorofila presente nas folhas sofre alteração, enquanto a turgidez relevante diminui

rapidamente. Esse fato promove o amarelecimento e murchamento das folhas, que por sua vez reduz os valores de NDVI das áreas vegetadas.

Desta forma, após selecionar o arquivo matricial de NDVI como imagem de entrada da ferramenta *Fuzzy membership*, foi delimitado o maior valor do índice (0,89) para ocupar o valor mínimo do conjunto “*Fuzzy*” e o menor valor do índice (-0,35) para ocupar o valor máximo do conjunto, gerando assim uma função linear decrescente.

c) Altitude

A função de pertinência utilizada para definir a influência da altitude sobre o RIF foi a *Fuzzy Small*. Esta função, de acordo com Santos et al. (2017), representa a variação do grau de pertinência da imagem matricial, com valores de entrada mais baixos (altitudes menores) representando uma maior possibilidade de ser membro do conjunto de maior risco de incêndios florestais, porém com um comportamento da curva influenciado por um ponto médio. O ponto médio da curva foi 900 metros e o valor de inclinação da curva foi 5, o padrão do *software*, pois de acordo com a Tabela 2, altitudes inferiores a esse valor passam a apresentar riscos consideráveis de ocorrência de incêndios.

Tabela 2. Influência da altitude sobre o risco de incêndios florestais.

Classes de altitude (m)	RIF
> 1500	Muito baixo
1200 – 1500	Baixo
900 – 1200	Moderado
600 – 900	Alto
< 600	Muito alto

Fonte: Adaptado de Eugenio et al. (2016a).

d) Declividade

Já a influência da variável de declividade foi estabelecida pela função *Fuzzy Large*. A escolha dessa função de pertinência se deu pelo fato de que a mesma determina que quanto maior o valor de entrada (declividade do terreno), maior o risco de ocorrência de incêndios, porém com um comportamento da curva influenciado por um ponto médio (RAMALHO et al., 2021a). Desta forma, seguindo os parâmetros delimitados na Tabela 3, o ponto médio utilizado foi 15° e o valor de inclinação da curva foi 5, o padrão do *software*, pois a partir desse ponto os níveis de risco de incêndio passam a ser mais significativos.

Tabela 3. Influência da declividade sobre o risco de incêndios florestais.

Classes de declividade (°)	RIF
2,85 – 8,50	Muito baixo
8,51 – 15,00	Baixo
15,01 – 19,30	Moderado
19,31 – 24,20	Alto
> 24,20	Muito alto

Fonte: Adaptado de Ramalho et al. (2021a).

e) **Orientação do relevo**

A orientação do relevo, teve a sua influência sobre o RIF definida pela função de pertinência *Fuzzy Generalized Bell*. Essa função foi selecionada porque define que os valores que assumem as extremidades da curva são os com maiores níveis de propensão à ocorrência de incêndios florestais e os que assumem o ponto central da curva são aqueles com menor risco de incêndios (RAMALHO et al., 2021a). Desta forma, a face norte foi classificada como de maior risco e a face Sul como de menor risco (Tabela 4).

Tabela 4. Influência da orientação do relevo sobre o risco de incêndios florestais.

Orientação do relevo (°)	Face	RIF
-1	Plano	Muito baixo
0 – 22,5	Norte	Muito alto
22,5 – 67,5	Nordeste	Alto
67,5 – 112,5	Leste	Moderado
112,5 – 157,5	Sudeste	Baixo
157,5 - 202,5	Sul	Baixo
202,5 – 247,5	Sudoeste	Baixo
247,5 – 292,5	Oeste	Moderado
292,5 – 337,5	Noroeste	Alto
337,5 – 360	Norte	Muito alto

Fonte: Adaptado de Biazatti et al. (2021).

f) **Proximidade de estradas e de áreas consolidadas**

A função de pertinência da proximidade de estradas e de áreas consolidadas foi determinada a partir da relação entre a distância dessas variáveis e a possibilidade de ocorrência de incêndios florestais. Portanto, foi aplicada a função de pertinência *Fuzzy* linear decrescente, pois quanto mais próximo desses ambientes, maior o risco

de incêndios florestais (valor mais próximo de 1 no conjunto *Fuzzy*) e quanto mais distante, menor o risco (valor mais próximo de 0 no conjunto *Fuzzy*) (RIBEIRO; SOARES; BEPLLER, 2012; EUGENIO et al., 2016a; RAMALHO et al., 2021a).

Assim, depois de indicar o arquivo matricial de proximidade de estradas gerado pela distância euclidiana como imagem de entrada da ferramenta *Fuzzy membership*, foi delimitado o maior valor (4.254,71 metros) para ocupar o valor mínimo do conjunto “*Fuzzy*” e o menor valor (0 metros) para ocupar o valor máximo do conjunto, gerando assim uma função linear decrescente. O mesmo foi feito com o arquivo de distância das áreas consolidadas. No entanto, o maior valor dessa variável, que assumiu o valor mínimo do conjunto *Fuzzy*, foi 5.821,93 metros.

g) Precipitação

A função de pertinência utilizada para definir a influência da precipitação sobre o RIF foi a *Fuzzy Small*, pois quanto menores os valores de precipitação, maior a possibilidade de ocorrência de incêndios florestais, e vice-versa (EUGENIO et al., 2016a). O ponto médio da curva foi 1.100,01 mm e o valor de inclinação da curva foi 5, o padrão do *software*, pois de acordo com a Tabela 5, precipitações inferiores a esse valor passam a apresentar riscos consideráveis de ocorrência de incêndios.

Tabela 5. Influência da precipitação sobre o risco de incêndios florestais.

Precipitação (mm)	RIF
≥ 1300	Muito baixo
1200,1 – 1300	Baixo
1100,1 – 1200	Moderado
1000,1 – 1100	Alto
< 1000	Muito alto

Fonte: Adaptado de Eugenio et al. (2016a).

h) Temperatura do ar e temperatura da superfície terrestre

A influência das variáveis de temperatura do ar e temperatura da superfície terrestre foram estabelecidas pela função *Fuzzy Large*, haja vista que quanto maior o valor dessas variáveis, maior o risco de ocorrência de incêndios (EUGENIO et al., 2016a). Desta forma, seguindo os parâmetros delimitados na Tabela 6, o ponto médio utilizado para a temperatura do ar foi de 20,1 °C e para a temperatura da superfície terrestre foi de 25,1 °C e os valores de inclinação da curva foram 5, o padrão do *software*, pois a partir desses pontos os níveis de risco de incêndio passam a ser mais significativos.

Tabela 6. Influência da temperatura do ar e da superfície sobre o risco de incêndios florestais.

Temperatura do ar (°C)	RIF
< 18	Muito baixo
18,01 – 20	Baixo
20,1 – 22	Moderado
22,1 – 24	Alto
> 24,1	Muito alto
Temperatura da superfície terrestre (°C)	RIF
< 20	Muito baixo
20 – 25	Baixo
25,1 – 30	Moderado
30,1 - 35	Alto
> 35	Muito alto

Fonte: Adaptado de Mota et al. (2019) e Parajuli et al. (2020).

i) Velocidade do vento

A influência da velocidade do vento sobre os riscos de ocorrência de incêndios foi estabelecida pela função de pertinência *Fuzzy Large*, pois quanto maior a velocidade dos ventos, maior o risco de ocorrência de incêndios (SANT'ANNA; FIEDLER; RAMALHO, 2020). Desta forma, seguindo os parâmetros delimitados na Tabela 7, o ponto médio utilizado foi de 14,5 km.h⁻¹ e o valor de inclinação da curva foi 5, o padrão do *software*, pois a partir desses pontos os níveis de risco de incêndio passam a ser mais significativos.

Tabela 7. Influência da velocidade do vento sobre o risco de incêndios florestais.

Velocidade do vento (km.h ⁻¹)	RIF
< 10,8	Muito baixo
10,9 – 14,4	Baixo
14,5 – 18	Moderado
18,1 – 19,8	Alto
> 19,9	Muito alto

Fonte: Adaptado de Guo et al. (2016).

j) Umidade relativa do ar

A influência da umidade relativa do ar sobre o RIF foi estabelecida pela *Fuzzy Small*, dado o fato que menores valores de UR, resultam em maior risco de incêndios

florestais, e vice-versa (SANT'ANNA; FIEDLER; RAMALHO, 2020). O ponto médio da curva foi 30% e o valor de inclinação da curva foi 5, o padrão do *software*, pois de acordo com a Tabela 8, valores de umidade inferiores a esse, refletem em riscos consideráveis de ocorrência de incêndios.

Tabela 8. Influência da umidade relativa do ar sobre o risco de incêndios florestais.

Umidade relativa do ar (%)	RIF
> 40	Muito baixo
30,1 – 40	Baixo
25,1 – 30	Moderado
16,1 – 25	Alto
< 16	Muito alto

Fonte: Adaptado de Eugenio et al. (2016a).

k) Déficit hídrico

A influência do déficit hídrico foi delimitada pela função de pertinência *Fuzzy Large*, haja vista que de acordo com Halofsky, Peterson e Harvey (2020), quanto maior a deficiência de água, maiores serão as frequências, extensões e gravidades dos incêndios florestais. O ponto médio da curva foi de 80,01 mm e o valor de inclinação da curva foi 5, o padrão do *software*, pois de acordo com a Tabela 9, valores de déficit hídrico superiores a esse, refletem em riscos consideráveis de ocorrência de incêndios florestais.

Tabela 9. Influência do déficit hídrico sobre o risco de incêndios florestais.

Déficit hídrico (mm)	RIF
< 60	Muito baixo
60,1 – 80	Baixo
80,1 – 100	Moderado
100,1 – 120	Alto
> 120	Muito alto

Fonte: Adaptado de Eugenio et al. (2016a).

Na Figura 7 é apresentado o fluxograma de aplicação das funções de pertinência em cada uma das variáveis analisadas para o zoneamento de risco de incêndios florestais.

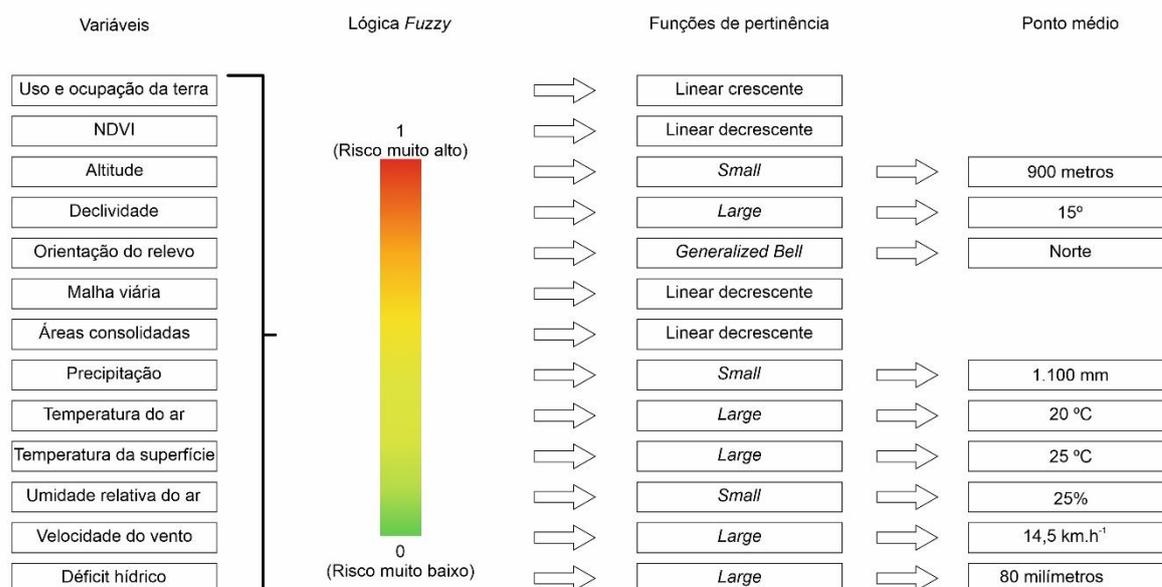


Figura 7. Fluxograma de aplicação das funções de pertinência em cada uma das variáveis analisadas para o zoneamento de risco de incêndios florestais.

4.4.3 Sobreposição Fuzzy

Após a aplicação das funções de pertinência foi aplicada a metodologia de sobreposição *Fuzzy Gamma* para avaliar a possibilidade de a célula da imagem matricial de cada variável pertencer a cada conjunto *Fuzzy*. Essa metodologia é traduzida como o produto algébrico da soma e do produto *Fuzzy*, ambos elevados à potência *Fuzzy* (RAMALHO, 2020) (Equação (2) (ESRI, 2021).

$$\mu(x) = \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right\}^y \times \left(\prod_{i=1}^n \pi_i \right)^{1-y} \quad (2)$$

Onde, μ_i são os valores de associação difusa para $i = 1, 2, \dots, 13$, o n é o número de variáveis no estudo e o y é o valor de coeficiente padrão (0,9).

Com o intuito de facilitar a visualização dos resultados, as imagens resultantes da aplicação da sobreposição *Fuzzy*, foram reclassificadas em cinco classes de risco (muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto) através da função “*Reclassify*” do software ArcGIS®, versão 10.3. Essa definição foi realizada a partir do método de classificação natural de *Jenks*. Dessa forma, foi possível quantificar o percentual de ocupação de cada classe de risco.

4.4.4 Validação do modelo

A fim de determinar o nível de confiabilidade do modelo proposto, foram utilizados os dados de cicatrizes de incêndio na área de estudo, ocorridas entre 1985

e 2020, disponibilizados pelo projeto Mapbiomas (2022). O mapeamento das cicatrizes de incêndios foi baseado em mosaicos de imagens dos satélites Landsat com resolução espacial de 30 metros, a partir de algoritmos de aprendizagem de máquina em plataformas que oferecem capacidade de processamento em nuvem. O procedimento aplicado para a validação do modelo proposto foi o cruzamento espacial de informações.

Inicialmente, todos os arquivos de cicatrizes de incêndios, obtidos em formato matricial, foram convertidos para o formato vetorial. Posteriormente, foi criada uma malha de pontos com distância linear de 30 metros, para compatibilizar com as demais variáveis, ao longo de toda a área de estudo a partir da ferramenta “*Create fishnet*” presente no *software* ArcGis®, versão 10.3. A criação da malha de pontos teve como objetivo o estabelecimento de pontos amostrais para posteriores procedimentos estatísticos.

Após a criação da malha de pontos amostrais, procedeu-se com o recorte do conjunto de pontos a partir das máscaras das classes de risco de incêndios florestais (muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto), gerando cinco arquivos vetoriais de pontos que foram usados como tratamentos estatísticos. Posteriormente, foram selecionados, aleatoriamente, 10 amostras anuais de cicatrizes de incêndios (1985, 1990, 1992, 1997, 1999, 2006, 2007, 2010, 2013 e 2018), para serem utilizadas como repetições.

Em seguida, a partir da ferramenta “*intersect*”, presente no *software* ArcGis®, versão 10.3, procedeu-se com o cruzamento tabular de cada uma das classes de RIF com cada uma das amostras anuais aleatorizadas, totalizando 50 amostras. Essas amostras foram submetidas à uma tabulação no *software* Microsoft Excel, onde foram calculadas as proporções de pontos em cada uma das amostras (Equação (3)).

$$P = \frac{N_{ca} \times 100}{N} \quad (3)$$

Onde o P é a proporção, em porcentagem, o N_{pc} é o número de pontos por classe e por ano e o N é o número total de pontos da classe.

Posteriormente, para a análise estatística dos valores de assertividade do modelo em cada uma das classes de risco, considerando as cicatrizes de incêndios, inicialmente aplicou-se o teste de normalidade (Shapiro-Wilk) a 5% de significância e posteriormente a análise de variância (ANOVA). O teste de médias aplicado foi Tukey a 5% de probabilidade utilizando o SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011).

4.5 Delimitação de áreas prioritárias para construção de aceiros

Para determinar áreas prioritárias de construção de aceiros de proteção contra incêndios florestais, foi aplicada a metodologia *Fuzzy*. A seguir, serão apresentados, cronologicamente, os passos necessários para a elaboração do modelo proposto.

4.5.1 Variáveis avaliadas

As variáveis consideradas para a determinação dos locais prioritários dos aceiros foram: Classes de alto e muito alto risco de incêndios florestais, declividade, proximidade de estradas, proximidade de propriedades rurais, limite do PARNA Caparaó e áreas impróprias para a construção.

De acordo com Guimarães et al. (2014), os aceiros devem englobar as áreas de maior risco de incêndio e áreas confrontantes dado o fato que sua construção demanda a retirada da camada vegetal presente sobre o solo para promover a quebra da continuidade do material combustível e assim servir como barreira de impedimento da propagação dos incêndios. Dessa forma, as classes de risco de incêndios florestais elaboradas na etapa anterior foram inseridas no modelo de determinação de áreas prioritárias de construção de aceiros pelo fato de que essas práticas podem influenciar negativamente nas características cênicas, biológicas e fisiológicas do meio ambiente, quando realizadas em locais não críticos.

4.5.2 Delimitação da influência de cada variável

a) *Declividade*

A influência da declividade foi delimitada pela função de pertinência *Fuzzy* Linear crescente. A escolha dessa função de pertinência se deu pelo fato de que a mesma determina que quanto maior o valor de entrada (declividade do terreno), maior a probabilidade de propagação das chamas (RAMALHO et al., 2021a). Neste sentido, os locais onde a velocidade de propagação é maior (áreas mais íngremes), a construção de aceiros é mais prioritária do que as áreas onde essa velocidade é reduzida (áreas menos íngremes).

b) *Proximidade de estradas e de propriedades rurais*

Quanto mais próximo das estradas, maior o risco de incêndios florestais (EUGENIO et al., 2016a; RAMALHO et al., 2021a; RIBEIRO; SOARES; BEPLER, 2012). Além disso, de acordo com Dennis (2005), os aceiros também têm a função de fornecer acesso rápido e seguro aos brigadistas, desta forma preferencialmente devem estar ligados às vias de acesso.

As áreas próximas das propriedades rurais também representam alto risco de ocorrência de incêndios, haja vista que a presença de comunidades rurais, muitas vezes resulta em queima de lixo e queimadas de limpeza que ocorrem nas matas e áreas de cultivo agrícola, que caso não sejam controlados podem invadir o interior do PARNA causando perdas ambientais imensuráveis (LIMA; DORNFELD, 2014).

Neste sentido, a influência da proximidade das estradas e das propriedades rurais foi determinada através da função de pertinência *Fuzzy* Linear decrescente que indica que quanto mais próximo das estradas e das propriedades rurais, maior a prioridade de criação de aceiros para proteger os recursos ambientais e a vida dos motoristas e pedestres das vias e as áreas residenciais e consolidadas presentes na área de estudo.

c) Limite do Parque Nacional do Caparaó

A influência da proximidade do interior da UC foi definida pela função de pertinência *Fuzzy linear* decrescente. Essa função foi aplicada com o intuito de introduzir no modelo uma restrição que priorize a proteção da UC. Sendo assim, quanto mais próximo do interior da unidade, maior a propensão de construção do aceiro.

Na Figura 8 é apresentado o fluxograma de aplicação das funções de pertinência em cada uma das variáveis analisadas para a delimitação de áreas prioritárias para construção de aceiros.



Figura 8. Fluxograma de aplicação das funções de pertinência em cada uma das variáveis analisadas para a delimitação de áreas prioritárias para construção de aceiros.

4.5.3 Sobreposição *Fuzzy*

Após a aplicação das funções de pertinência foi aplicada a metodologia de sobreposição *Fuzzy Gamma* para avaliar a possibilidade da célula da imagem

matricial de cada variável pertencer a cada conjunto *Fuzzy*. Nessa modelagem, o RIF foi inserido como variável de entrada.

Com o intuito de facilitar a visualização dos resultados, as imagens resultantes da aplicação da sobreposição *Fuzzy*, foram reclassificadas em cinco classes de prioridade (muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto) através da função “*Reclassify*” do *software* ArcGIS®, versão 10.3. Essa definição foi realizada a partir do método de classificação natural de *Jenks*. Dessa forma foi possível quantificar o percentual de ocupação de cada classe de risco.

d) Áreas impróprias para a construção

Uma das restrições impostas ao modelo para que o mesmo gerasse resultados confiáveis e aplicáveis foi a exclusão das áreas impróprias para a construção dos aceiros. Esse procedimento foi necessário para evitar que as áreas onde o modelo indicasse como prioritárias, não promovessem a retirada de vegetação nativa ou desapropriação de áreas consolidadas. Além disso, ambientes onde, naturalmente, já existe uma quebra do material combustível, também foram excluídas do modelo.

As áreas que compuseram o arquivo de áreas impróprias foram: rocha nua, áreas consolidadas, áreas urbanas, estradas, corpos d’água, mata nativa e solo exposto.

4.6 Delimitação dos locais ótimos para torres de monitoramento

Para determinar os locais ótimos para a instalação de torres de monitoramento de incêndios florestais, foram realizados procedimentos baseados na metodologia proposta por Eugenio et al. (2016b).

4.6.1 Variáveis avaliadas

As variáveis utilizadas para proceder com tal determinação foram: altitude, proximidade de estradas, uso e ocupação da terra e zoneamento de risco de incêndios florestais.

a) Altitude

A variável de altitude, derivada do modelo digital de elevação, foi utilizada na determinação dos pontos de maior elevação da área de estudo (cumes), que de acordo com Moreira, Mendes e Santos (2020), são os locais mais indicados para a construção da torre, tendo em vista que as cotas de maior altitude possibilitam um raio superior de visão da área em questão.

Sendo assim, o primeiro passo para determinar os locais das torres foi a identificação dos cumes a partir da inversão do modelo digital de elevação (Equação (4)).

$$\text{Dir.flux}_{\text{inv}} = \text{MDE}_c \times (-1) \quad (4)$$

Onde $\text{Dir.flux}_{\text{inv}}$ é a direção do fluxo de água invertida, o MDE_c é modelo digital de elevação corrigido e o -1 é a constante de inversão.

A equação supracitada foi aplicada a partir da “calculadora raster”, presente no *software* ArcGis®, versão 10.3. Posteriormente o produto gerado foi submetido à aplicação da ferramenta “Direção do fluxo” para criar o arquivo de direção de fluxo de água invertida. Esse procedimento simula que a água fluirá para pontos com maior altitude, haja vista que o MDE estará invertido. A partir do arquivo de direção do fluxo invertida, foi aplicada a ferramenta “Sink” para gerar as máscaras matriciais representativas dos cumes, que posteriormente foram convertidas para o formato vetorial. Nesta etapa, foram gerados 716 cumes.

b) Uso e ocupação da Terra

Após a geração dos cumes, foi realizada a reclassificação do arquivo de UOT com o objetivo de selecionar as classes aptas para a instalação das torres. Eugenio et al. (2016b) sugeriram que fossem classificadas as coberturas da terra que impossibilitassem a locomoção dos vigias ou a construção das torres ou que interferissem na vegetação original do PARNA, como inaptas. Nesse sentido, após a reclassificação do UOT e a exclusão das classes consideradas inadequadas (mata nativa, área urbana, área consolidada, rocha nua e massa d’água), foram mantidas no modelo as seguintes classes: campos de altitude; eucaliptocultura, macega, cafeicultura, pastagem e solo exposto.

c) Proximidade de estradas

A proximidade das estradas foi considerada na análise, pois, de acordo com Eugenio et al. (2016b), não é interessante que os vigias careçam de demasiado tempo e esforço físico para alcançar os locais das torres para proceder com eventuais manutenções e o monitoramento propriamente dito. Portanto, o próximo passo foi a delimitação da distância viável entre as vias (estradas e trilhas) e as torres para garantir o acesso às mesmas.

Desta forma, a partir do arquivo vetorial de malha viária, foram determinados dois cenários de distância ótima com a ferramenta *Buffer*, sendo eles: A) 150 metros entre a malha viária e as torres; e B) 300 metros entre a malha viária e as torres. Esses

cenários foram criados para avaliar a influência dessa distância na quantidade e localização ótima das torres.

d) Zoneamento de risco de incêndios florestais

A determinação dos locais ótimos para as torres levou em consideração o monitoramento do máximo de áreas classificadas com riscos alto e muito alto de ocorrência de incêndios florestais. Portanto, as classes de risco muito baixo, baixo e moderado, geradas no arquivo de RIF nas etapas anteriores, foram eliminadas do modelo.

4.6.2 Procedimentos metodológicos

No intuito de possibilitar uma melhor compreensão dos procedimentos metodológicos, a seguir serão listadas as etapas cronológicas realizadas no presente estudo.

4.6.2.1 Geração de quadrículas de forma sistemática na área de estudo

Seguindo a metodologia proposta por Eugenio et al. (2016b), para que fosse garantida a distribuição sistemática das torres, os limites da área de estudo foram divididos em quadrículas com distâncias pré-determinadas para evitar a subestimação ou superestimação de número de torres necessárias para visualizar toda a área.

No trabalho dos autores supracitados, foram avaliados cenários de quadrículas de 15x15 km, 17,5x17,5 km e 20x20 km. No entanto, os referidos autores fizeram uma análise do potencial de instalação para todo o estado do Espírito Santo, que possui uma área muito superior à do PARNA. Caso fossem adotados os mesmos valores, a quantidade de torres seria extremamente reduzida e possivelmente não atenderia aos objetivos do modelo de maneira eficiente. Sendo assim, no presente estudo foram propostos dois cenários de tamanho de quadrículas, sendo eles: 1) Quadrículas de 3x3 km; e 2) Quadrículas de 5x5 km.

4.6.2.2 Seleção dos cumes aptos

O arquivo de cumes, gerado anteriormente, foi submetido à dois processos de filtragem de aptidão a partir da ferramenta de recorte do ArcGis®, versão 10.3. Assim, inicialmente o recorte dos cumes foi realizado a partir da máscara de classes aptas de uso e ocupação da terra, reduzindo o total de cumes de 716 para 492.

O segundo processo de recorte foi realizado a partir das máscaras de distância das estradas. Assim foram gerados dois arquivos que representaram os cumes localizados em áreas aptas, tanto em relação ao uso e ocupação da terra quanto às

distâncias de percurso. O recorte realizado no cenário A de distância das estradas resultou em um total de 289 cumes aptos e o recorte realizado no cenário B resultou em um total de 332 cumes aptos.

4.6.2.3 Seleção dos cumes dentro de cada quadrícula

A partir dos cumes aptos gerados na etapa anterior, foram realizados novos recortes em cada quadrícula dos cenários propostos. Desse modo foi gerado com esse recorte os possíveis cumes dentro de cada quadrícula, tendo assim, uma distribuição mais uniforme das torres no PARNA, não superestimando ou subestimando a quantidade necessária em cada área.

Desta forma, após a seleção dos cumes nas quadrículas foram gerados os resultados de locais aptos para a instalação das torres em cada um dos cenários propostos. A combinação de cenários utilizados é apresentada na Tabela 10, para facilitar a compreensão da metodologia.

Tabela 10. Combinação dos cenários propostos entre a distância das estradas e os tamanhos das quadrículas para a área de estudo.

Cenário	Distância (m)	Tamanho de quadrícula (km)
A1	150	3
A2	150	5
B1	300	3
B2	300	5

Fonte: O autor (2022).

4.6.2.4 Seleção dos cumes de maior altitude dentro de cada quadrícula

Essa etapa foi realizada com o objetivo de garantir que o ponto de maior altitude de cada quadrícula fosse selecionado para a instalação teórica das torres. Neste sentido, foram realizados cruzamentos tabulares entre os cumes aptos, os arquivos de quadrículas e o MDE. Após a realização desse cruzamento, os cumes de maior altitude dentro de cada quadrícula foram mantidos e os demais foram eliminados do modelo, restando apenas um local ótimo de instalação de torres por quadrícula.

4.6.2.5 Validação do modelo

A metodologia de validação da localização dessas torres foi baseada na análise da visibilidade das mesmas. Assim, foi utilizada a ferramenta *visibility* para determinar as áreas visíveis por cada ponto observador (torre). Para isso o arquivo de pontos

referente à localização ótima das torres de cada um dos métodos propostos e o MDE foram utilizados como arquivos de entrada para gerar os arquivos matriciais de área visualizada de saída.

No entanto, antes de prosseguir o *software* solicita que o usuário determine o tipo de análise será utilizado, que nesse caso foi do tipo Frequência. Esse tipo de análise registra o número de vezes que cada local da célula na superfície do MDE pode ser visto pelas torres. Além disso, foi determinado uma altura fixa de 40 metros para todas as torres e inserida a correção da área de visualização de acordo com a curvatura da Terra. Isso por que de acordo com Eugenio et al. (2016b), a cada 10 km de distância ocorre uma redução de 7 m devido a uma diminuição de 8 m causada pela curvatura da terra e um aumento de 1 m dos efeitos da refração atmosférica. O coeficiente de refração da luz visível no ar foi determinado como sendo 0,13.

Os arquivos matriciais de área visualizada pelas torres em cada um dos cenários foram convertidos para o formato vetorial para proceder com o cruzamento tabular entre as classes de risco alto e muito alto de ocorrência de incêndios florestais e o de áreas visualizadas pelas torres de monitoramento para determinar a porcentagem de áreas que poderão ser cobertas pelas torres em cada cenário.

4.6.2.6 Análise de custos

Para elaborar uma análise de custos acerca da implantação das torres em cada um dos cenários propostos, foram utilizados valores médios encontrados na literatura. O custo por torre encontrado por Eugenio et al. (2016b) em agosto de 2016 foi de R\$ 100.000,00. Utilizando como base o valor do dólar do período pesquisado por Eugênio et al (2016b) e os valores atuais (junho de 2022) do dólar (R\$ 4,90), ficaria em torno de R\$ 150.000,00. As informações de área visualizada e o número de torres necessário em cada cenário, foram cruzadas com os valores de custo por torre para gerar o custo de implantação e o custo por hectare visualizado.

4.7 Zoneamento de áreas aptas para instalação de reservatórios de água

4.7.1 Variáveis avaliadas

Para elaborar o zoneamento de áreas aptas para instalação dos reservatórios de água para o combate aos incêndios florestais foi aplicada, novamente, a modelagem *Fuzzy*, seguindo a metodologia proposta por Ramalho et al. (2021b). Segundo a metodologia referida, foram utilizadas as seguintes variáveis: proximidade

de estradas e de cursos d'água, uso e ocupação da terra, declividade e as classes de risco de incêndios florestais.

A variável proximidade de estradas foi utilizada com o intuito de possibilitar, tanto o deslocamento dos veículos até o reservatório, quanto de máquinas e equipes destinados à construção das estruturas físicas e manutenção dos reservatórios. A proximidade de cursos d'água, no entanto, foi inserida no modelo com o objetivo de facilitar e promover o melhor aproveitamento desses recursos no abastecimento frequente dos reservatórios. O objetivo da análise das classes de UOT nesse modelo foi selecionar áreas para a construção dos reservatórios onde o impacto ambiental em áreas de cobertura natural fosse o menor possível. A declividade foi inserida para evitar que os reservatórios fossem alocados em ambientes com relevo muito íngreme que impossibilitasse a aproximação dos veículos terrestres e aéreos e a construção dos reservatórios. Por fim, as classes de RIF foram utilizadas como pontos de demanda, ou seja, foram estabelecidas no intuito de determinar quantos e quais os locais de risco os reservatórios deveriam atender de acordo com os cenários propostos.

Para analisar a influência da rede viária e hídrica na propensão à instalação dos reservatórios, foi aplicada a distância euclidiana no intuito de determinar a distância real no mapa.

4.7.2 Delimitação da influência de cada variável

a) Proximidade de estradas

Para delimitar a influência da proximidade de estradas na propensão à instalação dos reservatórios de água foi aplicada a função de pertinência *Fuzzy small* com ponto médio de 15 metros e o valor de inclinação da curva foi 5, o padrão do *software*, à variável de proximidade de estradas. Essa função indica que, dentro de um limite definido de 15 metros (comprimento médio da mangueira de coleta dos veículos de combate) de distância da estrada, quanto mais próximo das vias, maior a propensão a instalar pontos de captação de água (mais próximo de 1) e, à medida que a distância aumenta, a propensão diminui (mais próximo de 0) (RAMALHO et al., 2021b).

b) Proximidade de cursos d'água

A mesma função de pertinência (*Fuzzy small*) foi aplicada na variável de proximidade dos cursos d'água, no entanto, para esta foi utilizado o ponto médio de 30 metros e o valor de inclinação da curva foi 5, o padrão do *software*. Esse valor do

ponto médio corresponde ao limite de distância viável para a instalação dos reservatórios (30 metros) (RAMALHO et al., 2021b). Essa função indica que, dentro de um limite definido de 30 metros de distância do curso d'água, quanto mais próximo maior a propensão a instalar pontos de captação de água (mais próximos de 1) e, à medida que a distância aumenta, a propensão diminui (mais próximo de 0) (RAMALHO et al., 2021b).

c) Declividade

A função de pertinência aplicada sobre a variável de declividade foi a *Fuzzy Linear* decrescente. Essa função indica que, quanto maior a distância linear do ponto de interesse, menor a propensão à instalação dos reservatórios, ou seja, quanto maior a declividade, menor a probabilidade de instalação. Essa função de pertinência foi aplicada em função da facilidade de acesso dos veículos terrestres e aéreos e a construção dos reservatórios, sendo assim, quanto mais plano melhor.

d) Uso e ocupação da terra

Em relação ao UOT foram delimitadas as classes com maiores e menores probabilidades de instalação dos reservatórios. Para que fosse uma modelagem viável, as classes que apresentaram qualquer dificuldade de instalação ou necessidade de eliminação de vegetação com valor comercial, ambiental ou ecológico, foram determinados como as mais inviáveis. A função de pertinência aplicada para esta variável foi a *Fuzzy* gaussiana, onde o ponto médio foi 5 e o parâmetro de propagação da curva foi 0,1. Após reclassificar os valores das classes de UOT para aplicar a função de pertinência, cada classe assumiu os valores mostrados na Tabela 11.

Tabela 11. Ranking de influência das classes de UOT sobre a propensão à instalação dos reservatórios de água.

Classe UOT	Ranking de propensão	Valor na Tabela de Atributos
Mata nativa	5 ^o	1
Campos de altitude	4 ^o	2
Eucaliptocultura	3 ^o	3
Pastagem	2 ^o	4
Solo exposto	1 ^o	5*
Macega	2 ^o	6
Cafeicultura	3 ^o	7
Área consolidada	4 ^o	8
Rocha nua	5 ^o	9

*Classe representada pelo valor central que representa a maior influência na propensão à instalação de reservatórios de água para abastecimento de veículos de combate a incêndios florestais.

Fonte: O autor (2022).

O maior valor de influência atribuído à classe de solo exposto foi definido com base na facilidade de instalação, eliminando operações de eliminação de vegetação com valor comercial, ambiental ou ecológico (RAMALHO et al., 2021b). Neste mesmo sentido, a delimitação das classes de mata nativa e rocha nua como as de menor propensão derivam da inviabilidade ambiental, legal e operacional da instalação dos reservatórios nessas áreas.

Na Figura 9 é apresentado o fluxograma de aplicação das funções de pertinência em cada uma das variáveis analisadas para o zoneamento de áreas aptas para instalação de reservatórios de água.

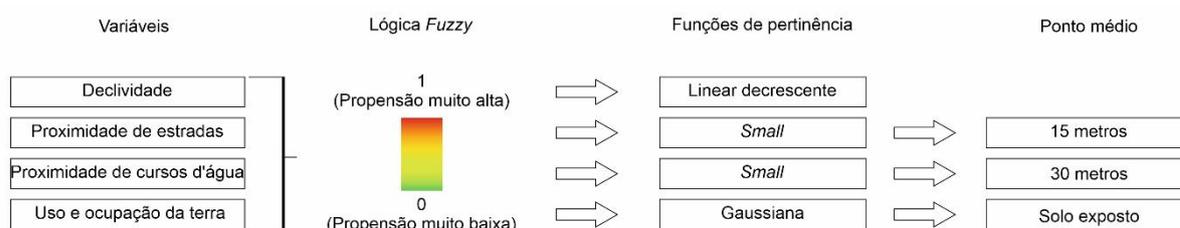


Figura 9. Fluxograma de aplicação das funções de pertinência em cada uma das variáveis analisadas para o zoneamento de áreas aptas para instalação de reservatórios de água.

4.7.3 Sobreposição *Fuzzy*

Após a aplicação das funções de pertinência foi aplicada a metodologia de sobreposição *Fuzzy Gamma* para avaliar a possibilidade da célula da imagem matricial de cada variável pertencer a cada conjunto *Fuzzy*. Com o intuito de facilitar a visualização dos resultados, as imagens resultantes da aplicação da sobreposição *Fuzzy*, foram reclassificadas em cinco classes de propensão (muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto) através da função “*Reclassify*” do *software* ArcGIS®, versão 10.3. Essa definição foi realizada a partir do método de classificação natural de *Jenks*. Dessa forma foi possível quantificar o percentual de ocupação de cada classe de propensão.

4.7.4 Determinação dos locais ótimos para os reservatórios de água

Com o zoneamento das áreas aptas para instalação de reservatórios de água elaborado, foram delimitados os locais ótimos para a instalação dos reservatórios através da aplicação das técnicas de análise de redes presentes no *software* ArcGis®, versão 10.3.

De acordo com Ramalho et al. (2021b), os reservatórios de água devem ser implantados de maneira a priorizarem o atendimento de áreas com maior risco de ocorrência de incêndio, que no caso da presente pesquisa são as classes de RIF alto e muito alto. Desta forma, para a presente pesquisa foram realizadas as otimizações a partir das áreas de propensão “alta” e “muito alta” à instalação dos reservatórios de água e apenas as classes de risco “alto” e “muito alto” de ocorrência de incêndios florestais.

Posteriormente, foi necessário converter os polígonos referentes às áreas de probabilidade alta e muito alta para instalação de reservatórios de água em pontos de oferta, e as áreas de risco de ocorrência de incêndios em pontos de demanda. Para tal foi criada uma malha de *grids* de 250 m, ao longo de toda a área de estudo através da ferramenta de criação de redes do ArcGis®, versão 10.3. Esse tamanho de célula foi utilizado para que a área selecionada tenha dimensões suficientes para instalar a estrutura dos reservatórios. Quando se utiliza essa ferramenta, o *software*, automaticamente, estabelece amostras pontuais no centro de cada uma das células criadas, fornecendo os pontos de entrada do modelo a ser implementado.

Posteriormente, para transformar os pontos criados em pontos de oferta ou de demanda, procedeu-se com o recorte destes sobre as áreas de interesse, ou seja, foram recortados os pontos através de duas máscaras: a) máscaras de propensão

alta e muito alta de instalação dos reservatórios – pontos de oferta (1209); b) máscaras de classes de risco alto e muito alto de ocorrência de incêndios florestais – pontos de demanda (1.677).

A partir dos pontos de demanda e de oferta e da malha viária da área de estudos foi possível dar início ao procedimento de análise de redes para determinar a quantidade e localização ótimas de reservatórios de água para abastecimento de veículos de combate a incêndios florestais. No entanto, diferentemente da pesquisa dos autores Ramalho et al. (2021b), no presente estudo foram propostos dois modelos de combate aos incêndios florestais, sendo eles o combate por veículos terrestres (caminhonetes equipadas com tanque de água) e por aeronaves (helicópteros equipados com *Bambi Bucket* - uma espécie de balde acoplado a uma aeronave para armazenamento e transporte de água para combate aos incêndios florestais em áreas de difícil acesso). Esses dois modelos foram propostos devido à conhecida dificuldade de acesso a determinadas áreas do parque por veículos terrestres e pela escassez de vias terrestres.

Portanto, inicialmente foi preciso configurar a tabela de atributos da malha viária para calcular o perímetro de cada trecho e o tempo gasto para percorrê-los de acordo com a velocidade da via. Assim, as velocidades de cada uma estão dispostas na Tabela 12.

Tabela 12. Configuração da tabela de atributos da malha viária em relação à velocidade média de cada via.

Classe de estradas	Velocidade média do veículo vazio	Velocidade média do veículo carregado
Primárias	60 km.h ⁻¹	40 km.h ⁻¹
Secundárias	40 km.h ⁻¹	30 km.h ⁻¹
Terciárias	30 km.h ⁻¹	20 km.h ⁻¹
Agrícolas	20 km.h ⁻¹	20 km.h ⁻¹

Para gerar os dados do campo de tempo de viagem em minutos, foi aplicada a Equação (5).

$$T = \frac{P}{(V \times 16,6667)} \quad (5)$$

Onde o T é o tempo de viagem (minutos) o P é o perímetro do trecho (metros), o V é a velocidade de deslocamento (km.h⁻¹) e o 16,6667 é a constante de conversão de km.h⁻¹ para m.min⁻¹.

Para determinar o tempo de viagem do combate realizado com helicópteros, foi utilizada a malha de rede de 250 metros criada anteriormente para representar uma malha aeroviária hipotética. Esse procedimento foi realizado pelo fato que a análise de redes requer um conjunto de vias, desta forma, como os helicópteros podem realizar viagens em sentidos lineares, a criação dessa malha equidistante foi representativa (Figura 10).

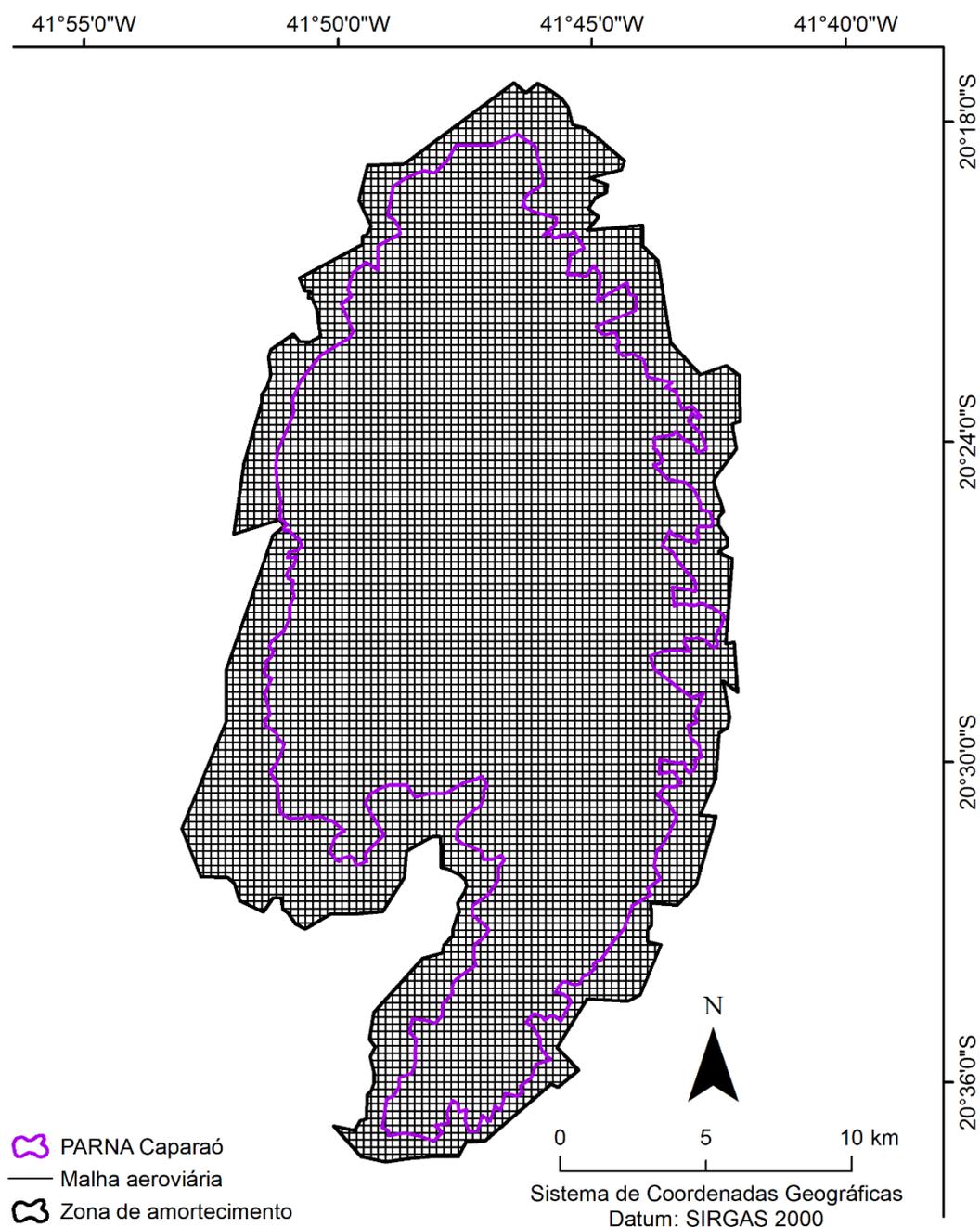


Figura 10. Malha equidistante representativa da rede aeroviária hipotética sobre a área de estudo.

Fonte: O autor (2022).

Assim como na malha rodoviária, foi preciso configurar a tabela de atributos da malha aeroviária para calcular o perímetro de cada trecho e o tempo gasto para percorrê-los de acordo com a velocidade de deslocamento dos helicópteros, que de acordo com Seyzinski et al. (2019), 80 km.h^{-1} é uma velocidade segura e eficiente para esta atividade.

Após a configuração dos dados de entrada, foi realizada a alocação dos reservatórios, a partir da ferramenta Localização-alocação presente na função de análise de redes do ArcGis®, versão 10.3. Essa modelagem permite ao usuário encontrar os melhores locais para as instalações atenderem a um conjunto de locais de demanda.

Para evitar a sobrecarga dos pontos de oferta, foi utilizado o problema “maximizar a capacidade de cobertura”. Esse problema responde à seguinte questão: Quantos e quais são os pontos de oferta necessários para que todos os pontos de demanda sejam atendidos, sem sobrecarregá-los?. O problema exige que o usuário determine qual a impedância a ser seguida durante a construção da rede de atendimentos. A impedância selecionada foi o tempo de deslocamento, haja vista que de acordo com Lima et al. (2018), o tempo máximo de deslocamento para um combate eficiente aos incêndios florestais são de 30 minutos. Desta forma, considerando o tempo de abastecimento dos veículos de 10 minutos, foram criados quatro cenários de tempo de combate, que somados resultam em no máximo 30 minutos (Tabela 13).

Tabela 13. Cenários de tempo de deslocamento e abastecimento dos veículos de combate.

Cenário	Tempo de deslocamento (minutos)	Tempo de abastecimento (minutos)
T_{d1}	5	10
T_{d2}	10	10
T_{d3}	15	10
T_{d4}	20	10

Fonte: O autor (2022).

O tempo de abastecimento dos veículos foi definido com base no trabalho de Ramalho et al. (2021b). De acordo com esses autores, relatos técnicos de encarregados por combate à incêndios florestais com veículos desenvolvidos para estas atividades afirmam que o tempo hábil para abastecimento é de 10 minutos. Como o modelo possui metodologia aplicável, replicável e editável, os interessados podem adequar os tempos propostos para cada realidade.

Além do tempo de deslocamento, o modelo exige que seja determinada a quantidade de pontos de demanda máximo por instalação de oferta. Foi adotado um valor de 50 pontos por instalação (RAMALHO et al., 2021b) visando a adoção de uma quantidade economicamente viável para a UC, sendo um valor passível de alteração no modelo para atender a realidade de outras áreas.

Por fim, para fornecer uma base de dados sólida que ofereça opções economicamente viáveis e mais acessíveis ao PARNA Caparaó, foram propostos quatro cenários de atendimento às demandas. Sendo eles: a) atendimento de 100% da demanda passível de atendimento; b) atendimento de 90% da demanda passível de atendimento; c) atendimento de 80% da demanda passível de atendimento; e d) atendimento de 70% da demanda passível de atendimento.

Desta forma, os cenários avaliados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Combinação dos cenários entre o tipo de combate, tempo de ataque e porcentagem de atendimento às demandas.

Cenário	Forma de combate	Tempo de ataque (minutos)	Porcentagem de atendimento (%)
A1	Terrestre	5	100
A2			90
A3			80
A4			70
A5	Terrestre	10	100
A6			90
A7			80
A8			70
A9	Terrestre	15	100
A10			90
A11			80
A12			70
A13	Terrestre	20	100
A14			90
A15			80
A16			70
B1	Aéreo	5	100
B2			90
B3			80
B4			70
B5	Aéreo	10	100
B6			90
B7			80
B8			70
B9	Aéreo	15	100
B10			90
B11			80
B12			70
B13	Aéreo	20	100
B14			90
B15			80
B16			70

Fonte: O autor (2022).

4.7.4.1 Análise de custos

Para elaborar uma análise de custos acerca da implantação dos reservatórios em cada um dos cenários propostos, foram utilizados valores médios encontrados em pesquisa de mercado. O custo por reservatório tipo taça encontrado fornecido pela

empresa ZANOM (2022) foi de R\$ 29.000,00. As informações de área atendida e o número de reservatórios necessário em cada cenário, foram cruzadas com os valores de custo por reservatório para gerar o custo de implantação e o custo por hectare atendido.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Risco de incêndios florestais

5.1.1 Ranking de risco das classes de UOT

Os resultados encontrados acerca da análise estatística da intensidade de queima dos materiais combustíveis mostraram que todos os dados apresentaram normalidade e homogeneidade de variâncias. Os resultados da análise de variância demonstraram a existência de diferença ao nível de 5% de significância (Tabela 15).

Tabela 15. Análise de variância da intensidade de queima dos materiais combustíveis.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P- valor
Tratamento	5	64.074,13	12814,83	90,86	0,00001
Resíduo	12	1.692,48	0,320503	-	-
Total	17	65.766,61	141,04	-	-

Fonte: O autor (2022).

Haja vista que existe diferença significativa entre as médias, procedeu-se com o teste de médias (Tukey a 5%). Desta forma, a partir dos resultados apresentados na Tabela 18, percebe-se que as classes de UOT com maiores níveis de intensidade de queima e, conseqüentemente, maior probabilidade de ocorrência de incêndios foram, respectivamente, pastagem (195,16 kcal. Kg⁻¹), macega (177,85 kcal. Kg⁻¹) e eucaliptocultura (165,72 kcal. Kg⁻¹).

Tabela 16. Teste de médias da intensidade de queima dos materiais combustíveis.

Classes de Risco	Médias (kcal. Kg ⁻¹)
Pastagem	195,16 a
Macega	177,85 a
Eucaliptocultura	165,72 ab
Campos de altitude	141,95 b
Mata nativa	72,69 c
Cafeicultura	29,4 d

Médias seguidas de mesma letra não apresentam diferença significativa entre si.

Fonte: O autor (2022).

Desta forma, a partir dos resultados encontrados na Tabela 18, foi possível estabelecer o *ranking* de influência das classes de UOT sobre o risco de incêndios florestais (Tabela 17).

Tabela 17. Ranking de influência das classes de UOT sobre o risco de incêndios florestais.

Classe UOT	Ranking de risco	Valor na Tabela de Atributos
Pastagem	1º	7
Macega	2º	6
Eucaliptocultura	3º	5
Campos de altitude	4º	4
Mata nativa	5º	3
Cafeicultura	6º	2
Área urbana	7º	1
Área consolidada	7º	1
Rocha nua	7º	1
Solo exposto	7º	1
Massa d'água	7º	1

Fonte: O autor (2022).

Corroborando com as informações de Biazatti et al. (2021), as classes de pastagem e macega são as de maior risco de incêndios (Tabela 17), haja vista que a intensidade de queima apresentou resultados mais altos para essas classes (Tabela 16). De acordo com os autores mencionados, áreas não cobertas com vegetação que forma dossel denso, como as pastagens e macegas, são mais propícias à ocorrência e propagação do fogo, pelo fato de estarem constantemente expostas à radiação solar e de apresentarem menor temperatura de ignição. Por essa razão, as classes pastagem e macega receberam, respectivamente, os maiores valores de risco de ocorrência de incêndios (7 e 6) (Tabela 17).

Juvanhol, Fiedler e Santos (2015), por sua vez, atestaram em sua pesquisa que as áreas cobertas por plantios florestais estão propensas à ocorrência de incêndios florestais por apresentarem condições favoráveis à propagação do fogo devido ao acúmulo de material combustível nessas áreas, facilitando assim a propagação do fogo e aumentando sua intensidade. Resultados semelhantes foram encontrados na

análise de intensidade de queima, que mostrou que a eucaliptocultura é a que apresenta o terceiro maior valor de queima ($165,72 \text{ kcal. Kg}^{-1}$) (Tabela 16). Neste sentido, essa classe de UOT foi inserida no modelo com o terceiro maior valor de risco (5) (Tabela 17).

As áreas cobertas pelas classes de área urbana, área consolidada, rocha nua, solo exposto e massa d'água foram inseridas no modelo com o menor valor de risco de incêndios florestais devido ao fato de não possuírem vegetação em sua superfície (Tabela 17).

5.1.2 Análise do risco de incêndios florestais

A elaboração de um modelo geotecnológico de risco de incêndios florestais em UCs da Mata Atlântica, por meio da aplicação da lógica *Fuzzy* sobre as variáveis de influência, buscando como resultado final o desenvolvimento de um mapeamento de risco, apresentou resultados satisfatórios ao término desse estudo.

Nas Figura 11 e 9 são apresentados os resultados da influência das variáveis avaliadas nas classes de risco de incêndio florestal, bem como a disposição geográfica, após a aplicação da lógica *Fuzzy*.

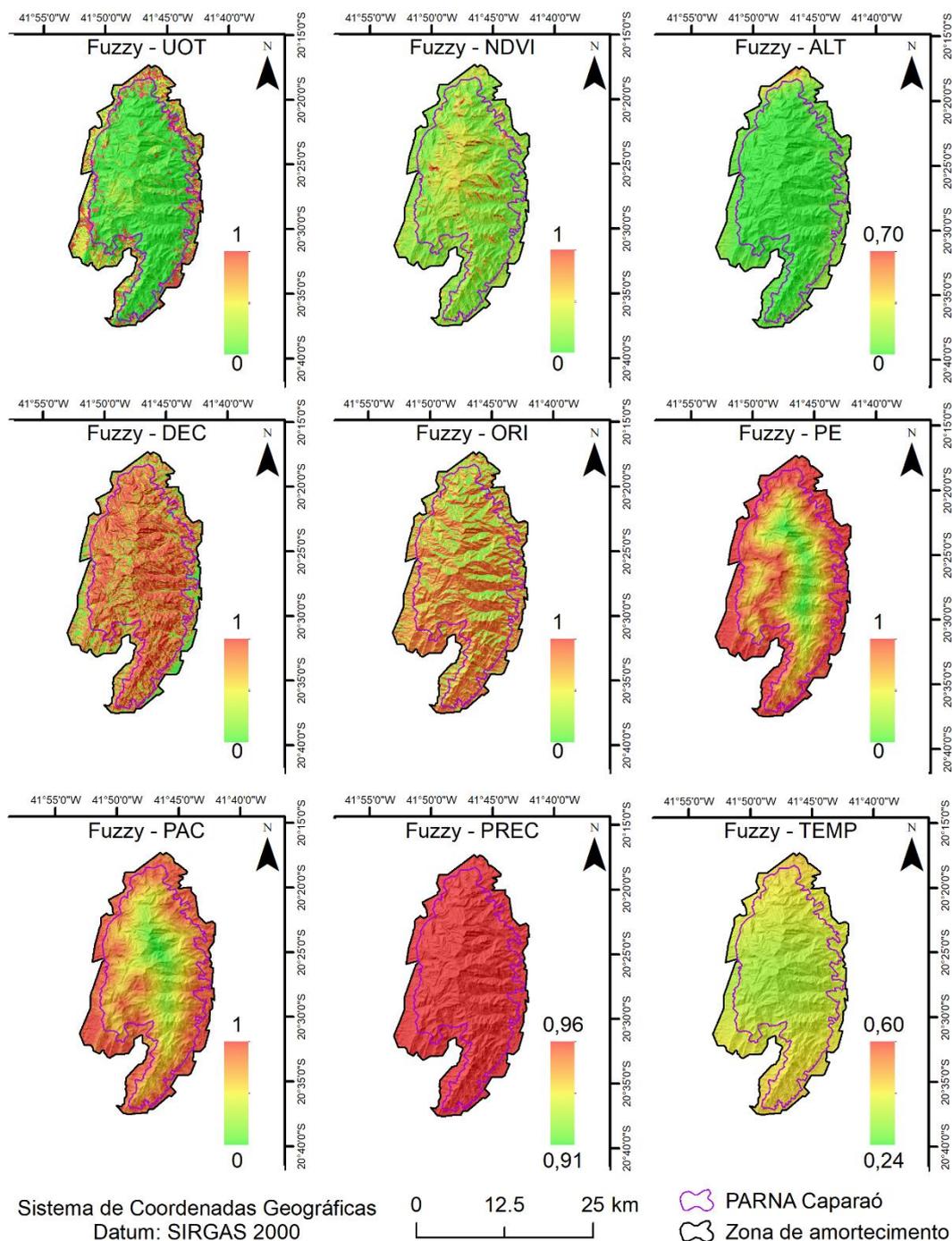
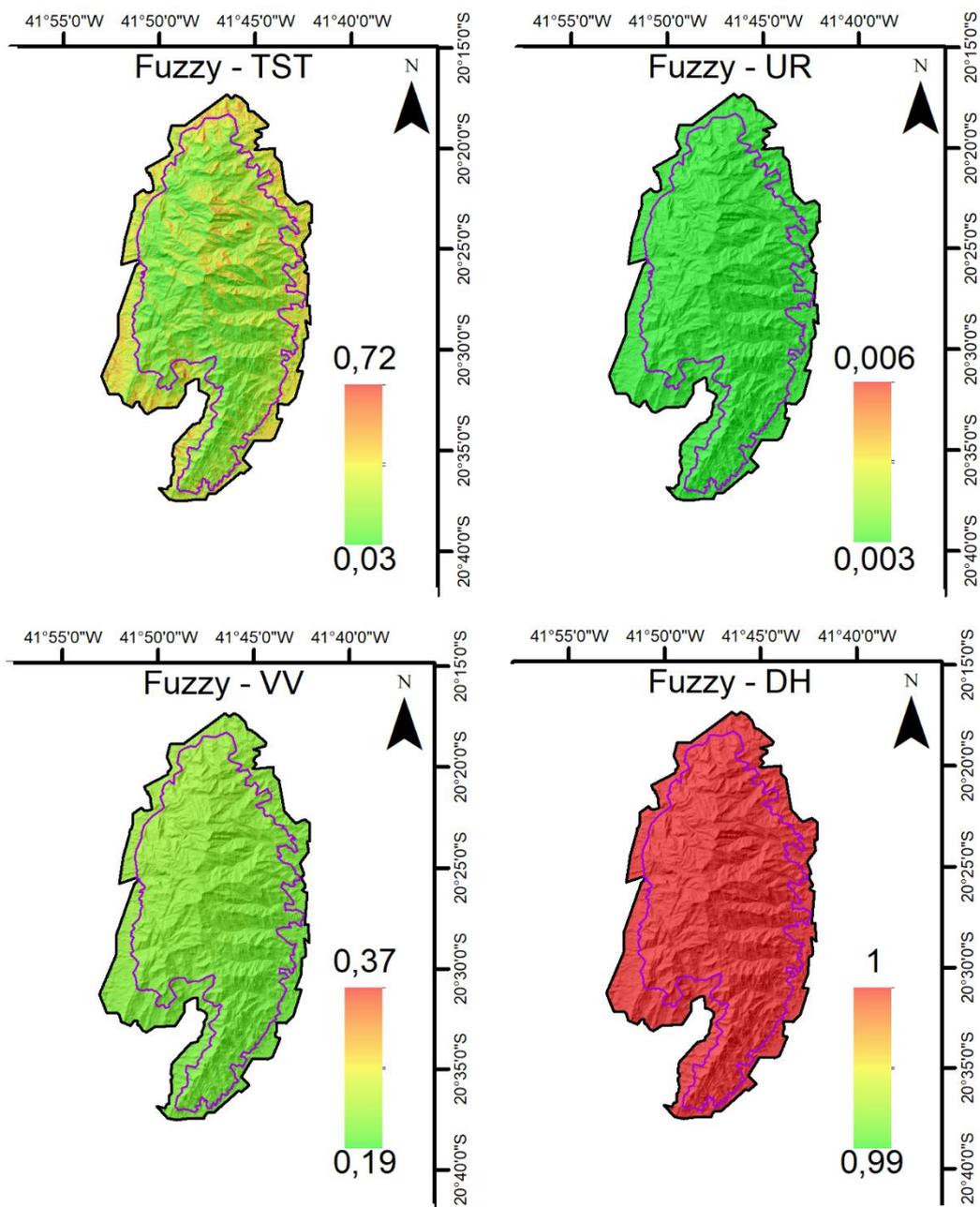


Figura 11. Influência das variáveis sobre o risco de incêndios florestais.

Onde, UOT é o Uso e Ocupação da Terra, NDVI é o Índice de Vegetação com Diferença Normalizada, ALT é a Altitude, DEC é a Declividade, ORI é a Orientação do Relevo, PE é a Proximidade das estradas, PAC é a Proximidade das áreas consolidadas, PREC é a Precipitação e TEMP é a Temperatura do ar.

Fonte: O autor (2022).



Sistema de Coordenadas Geográficas

Datum: SIRGAS 2000

0 12.5 25 km

 PARNÁ Caparaó
 Zona de amortecimento

Figura 12. Influência das variáveis sobre o risco de incêndios florestais.

Onde, TST é a temperatura da superfície terrestre, UR é a umidade relativa do ar, VV é a velocidade do vento e DH é o déficit hídrico.

Fonte: O autor (2022).

A partir dos resultados apresentados na Figura 11, percebe-se que as classes de UOT com valores mais próximos de 1 no conjunto *Fuzzy*, ou seja, com maior probabilidade de ocorrência de incêndios florestais são aquelas localizadas na ZA.

Esse fato ocorre porque é justamente na ZA onde se encontra a maior concentração de pastagem e eucaliptocultura (Figura 5). O mesmo ocorre no trabalho de Biazatti et al. (2021), onde as áreas de maior risco de incêndios florestais da Floresta Nacional do Rio Preto, no Espírito Santo, situaram-se próximas às classes de UOT referentes às ações antrópicas (pastagem, silvicultura e proximidade de estradas).

Ainda de acordo com os resultados apresentados na Figura 11, a parte central do PARNA Caparaó é praticamente toda coberta pelos valores mais baixos do conjunto *Fuzzy*, representando, portanto, menor risco de ocorrência de incêndios. Isso ocorre porque no interior do Parque, as três classes majoritárias (mata nativa, rocha nua e campos de altitude) (Figura 5), não apresentam valor elevado de risco de ocorrência de incêndios, de acordo com a classificação proposta na Tabela 17.

Valores mais altos de NDVI, como mencionado por Maselli et al. (2003), representam menor risco de incêndios florestais, dado o fato que esses indicam vegetação mais verde, úmida e com maior vigor. Em contrapartida, valores mais baixos de NDVI são indicativos de maior risco de incêndios florestais, dado o fato que de acordo com Maselli et al. (2003), após condições de estresse hídrico, o conteúdo clorofila presente nas folhas sofre alteração, enquanto a turgidez relevante diminui rapidamente. Esse fato promove o amarelecimento e murchamento das folhas, que por sua vez reduz os valores de NDVI das áreas vegetadas e deixa o material combustível mais seco e propício aos incêndios.

Na Figura 11 esse fato é elucidado quando se percebe que em áreas com NDVI mais baixo, ou seja, em áreas com vegetação mais seca ou mais esparsa, como é o caso da macega e dos campos de altitude, o valor *Fuzzy* se aproximou de 1, enquanto as áreas com vegetação mais densa e vigorosa esses valores se aproximaram de 0 no conjunto *Fuzzy*.

Em relação à altitude, é possível perceber na Figura 5, a maior parte da área de estudo é coberta por altitudes acima de 600 metros, corroborando com as informações encontradas por Batalha, Delpupo e Faria (2014). Os autores mencionados afirmaram em sua pesquisa que a Serra do Caparaó, região onde se situa o PARNA, é caracterizada por uma cadeia de montanhas que se eleva, de forma abrupta até a altitude de 2.890 m, formando o Maciço do Caparaó. Neste sentido, a partir dos valores estabelecidos na Tabela 2 e nos resultados expressos na Figura 5, é possível perceber que esta variável pouco influencia no risco de ocorrência de incêndios florestas do PARNA Caparaó.

Em contrapartida, a variação das condições do relevo do PARNA e a presença de elevada quantidade de áreas acidentadas, podendo atingir até 76,63° de inclinação, principalmente no interior da UC (Figura 5), influenciaram diretamente na alta proporção de áreas com alto valor *Fuzzy* (Figura 11). Esta relação de variação da declividade e risco de incêndios florestais é evidenciada por Ramalho et al. (2021a), ao afirmarem que quanto mais inclinada é a área, maior a chance de propagação do fogo e conseqüentemente conversão deste em incêndios florestais. No trabalho dos autores mencionados, percebeu-se uma diferença com a presente pesquisa, dado o fato que na área pesquisada por eles, a declividade foi uma das variáveis que mais contribuiu para a maior representatividade das classes de baixo e moderado risco, dado o fato que a maior proporção de classes de declividade encontrada na área de estudo (62,51%) foi entre 0 e 3°.

A orientação do relevo é outra variável muito influente nos valores de risco de incêndios florestais mais elevados encontrados na presente pesquisa. Essa influência decorre do fato que boa parte do PARNA é composta pelas faces Norte e Noroeste (Figura 5), que de acordo com a classificação proposta na Tabela 4 representam os maiores riscos de ocorrência de incêndios florestais. O aumento do RIF nessas faces é explicado pelos autores Camargo et al. (2019), quando afirmam que a maior incidência de raios solares e de ventos mais frequentes, promovem o aquecimento e secagem mais rápida do material combustível, deixando-o, portanto, mais susceptível aos incêndios florestais, e, conseqüentemente, com maior valor no conjunto *Fuzzy* (Figura 11).

Assim como ocorre no UOT, a maior proporção de valores de risco de ocorrência de incêndios próximos de 1 no conjunto *Fuzzy* relacionados à proximidade da malha viária e das áreas consolidadas, ocorre na zona de amortecimento (Figura 11). Esse fato ocorre porque é na zona de amortecimento existe uma maior densidade de áreas antrópicas, como as estradas e as construções civis (Figura 5).

Nas variáveis meteorológicas, percebe-se na Figura 11, que o conjunto *Fuzzy* apresenta valores muito elevados em toda a área em relação à precipitação, variando de 0,91 a 0,96, expressando, conseqüentemente, risco muito elevado de ocorrência de incêndios florestais impulsionado por esta variável. O mesmo ocorre com o Déficit hídrico, que tem seu valor *Fuzzy* variando de 0,99 a 1 (Figura 12), haja vista que estas duas variáveis mantêm uma relação diretamente proporcional, sendo as chuvas o principal meio de entrada de água no sistema. Portanto, como vê-se na Figura 6, que a média de chuva anual no PARNA varia de 590 a 691 mm, e que a área de vegetação

densa é consideravelmente alta, a saída de água do sistema é mais elevada que a entrada, culminando em um déficit hídrico entre 369 e 409 mm anual (Figura 6).

A Figura 2 mostra que temperatura do ar média na região do PARNA, é relativamente amena (15,97 a 21,74 °C), em virtude da sua geolocalização e das elevadas altitudes apresentadas na área. Esse valor exerce forte influência sobre os resultados encontrados e apresentados na Figura 4, acerca dos valores médios de *Fuzzy* (0,24 a 0,60), não expressando nem risco muito alto e nem muito baixo de ocorrência de incêndios florestais.

A temperatura da superfície terrestre varia de 12,37 °C a 30,34 °C, atingindo os maiores valores principalmente nas áreas não vegetadas da zona de amortecimento (Figura 6). Os autores Maffioletti et al. (2021) explicaram essa relação em sua pesquisa, quando concluíram que a antropização está diretamente ligada ao aumento da temperatura da superfície, pois quanto menor a cobertura vegetal, menor a absorção da radiação eletromagnética emitida para a superfície e, conseqüentemente, maior a radiação refletida, gerando portanto maiores índices de TST. A temperatura da superfície é responsável pela alteração do microclima de áreas vegetadas, podendo influenciar ainda na secagem do material combustível fino presentes em tal área, aumentando, portanto, os valores do conjunto *Fuzzy* para esta variável nos locais onde ela se apresenta mais alta (Figura 12).

A umidade relativa do ar e a velocidade do vento não exerceram papel expressivo no aumento do risco de incêndios florestais, como pode ser percebido na Figura 12, onde os valores *Fuzzy* de UR variaram de 0,003 à 0,006 e os de velocidade do vento atingiram valor máximo de 0,37. Possivelmente, essas variáveis, em conjunto com a altitude e o NDVI, foram as principais responsáveis pelos valores baixos de risco de incêndios florestais no PARNA do Caparaó, como mostra a Figura 13.

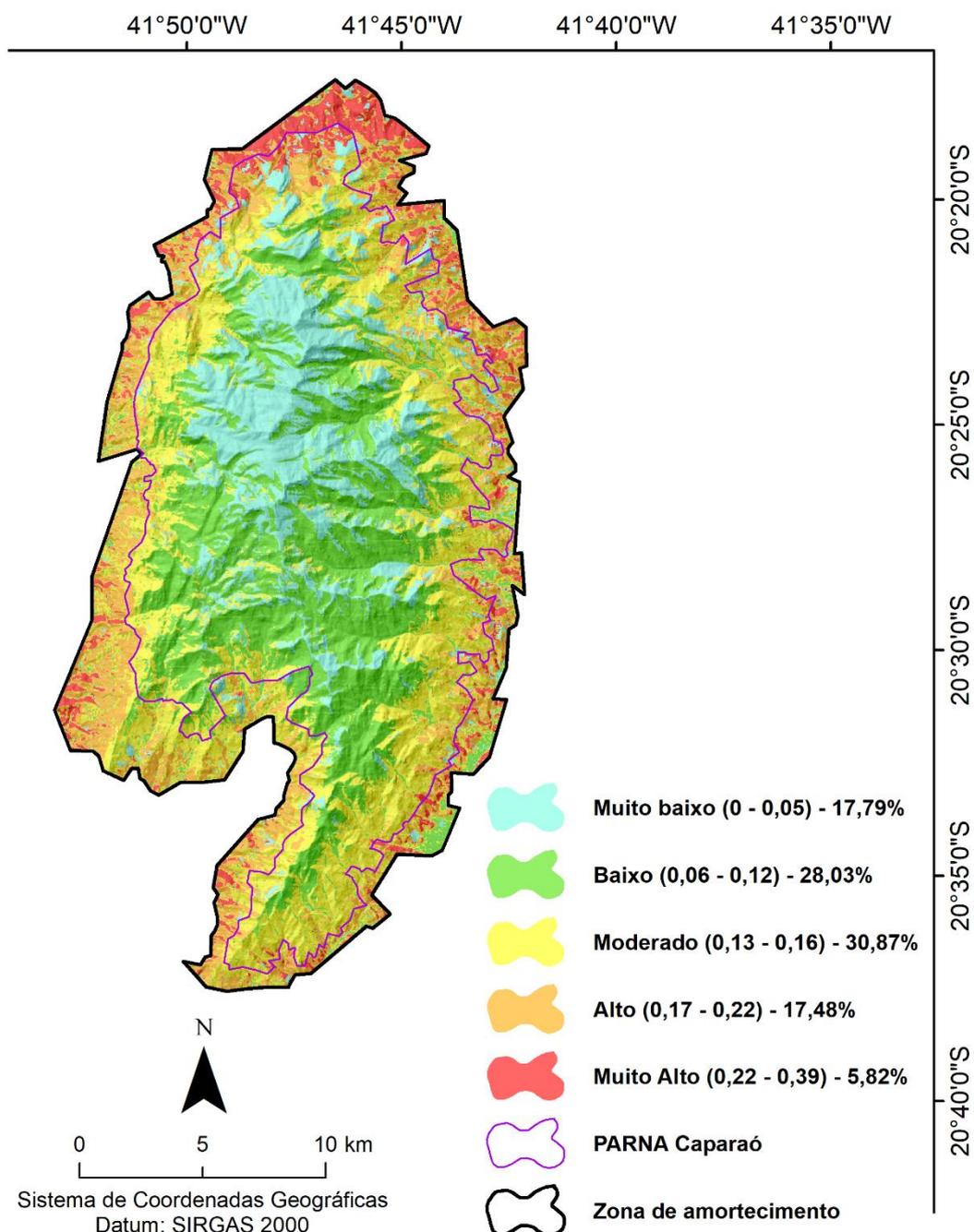


Figura 13. Risco de incêndios florestais no Parque Nacional do Caparaó e em sua zona de amortecimento, bem como distribuição espacial das classes do conjunto *Fuzzy*.

Fonte: O autor (2022).

A partir dos dados apresentados na Figura 13, observou-se que nenhuma das classes de risco de incêndios florestais no PARNA Caparaó e em sua ZA apresentam um valor *Fuzzy* muito elevado, sendo 0,39 o mais alto. Além disso, as classes de risco muito baixo (0 – 0,05), baixo (0,06 – 0,12) e moderado (0,13 – 0,16), juntas representam 76,69% da cobertura da área de estudo, tendo uma distribuição uniforme ao longo dos limites do PARNA. As áreas de risco alto (0,17 – 0,22) e muito alto (0,23

– 0,39), por sua vez, representam, juntas, apenas 23,31% da cobertura da área, sendo mais presentes na ZA.

Esse resultado evidencia que a área não apresenta risco de incêndios florestais expressivo, no entanto, por se tratar de uma UC de elevada importância ecológica, ainda que o risco não seja muito significativo, é importante traçar medidas de proteção para evitar que uma ocorrência simples se torne um incêndio de proporções catastróficas.

Neste sentido, de acordo com as informações da Figura 13, as áreas que necessitam de maior atenção das autoridades e da população como um todo, situam-se na zona de amortecimento do PARNA. Como foi evidenciado nas Figuras Figura 11 e Figura 12, esse resultado foi influenciado, principalmente, pelas elevadas altitudes, pela configuração das classes de UOT menos susceptíveis aos incêndios, pela temperatura do ar e do solo mais amenas, pela velocidade do vento e pela umidade relativa do ar do interior do PARNA, aliados à presença de uma maior densidade de estradas, áreas consolidadas e de classes de UOT mais passíveis de ocorrência de incêndios na zona de amortecimento.

Apesar de a baixa expressividade das classes de risco alto e muito alto de incêndios florestais no interior do PARNA ser um bom resultado, no caráter ambiental, Lima e Dornfeld (2014) alertam para os perigos ambientais associados à ocupação antrópica nas zonas de amortecimento de UC. De acordo com a pesquisa mencionada, um dos principais problemas, nesse sentido, é a presença de comunidades rurais, onde muitas vezes não se tem um serviço de coleta de lixo, potencializando, portanto, a prática da queima deste. Aliado a esse fato, as queimadas de limpeza que ocorrem nas matas e áreas de cultivo agrícola presentes na zona de amortecimento, potencializam o risco de incêndios florestais, que caso não sejam controlados podem invadir o interior do PARNA causando perdas ambientais imensuráveis.

Corroborando com as informações supracitadas, as cicatrizes de incêndios encontrados para a área de estudo referentes aos anos aleatorizados (1985, 1990, 1992, 1997, 1999, 2006, 2007, 2010, 2013 e 2018), evidenciam que, na maior parte das vezes, os sinistros ocorreram onde as atividades antrópicas são mais frequentes, próximos da ZA ou dos locais de acampamento do PARNA, como mostra a Figura 14.

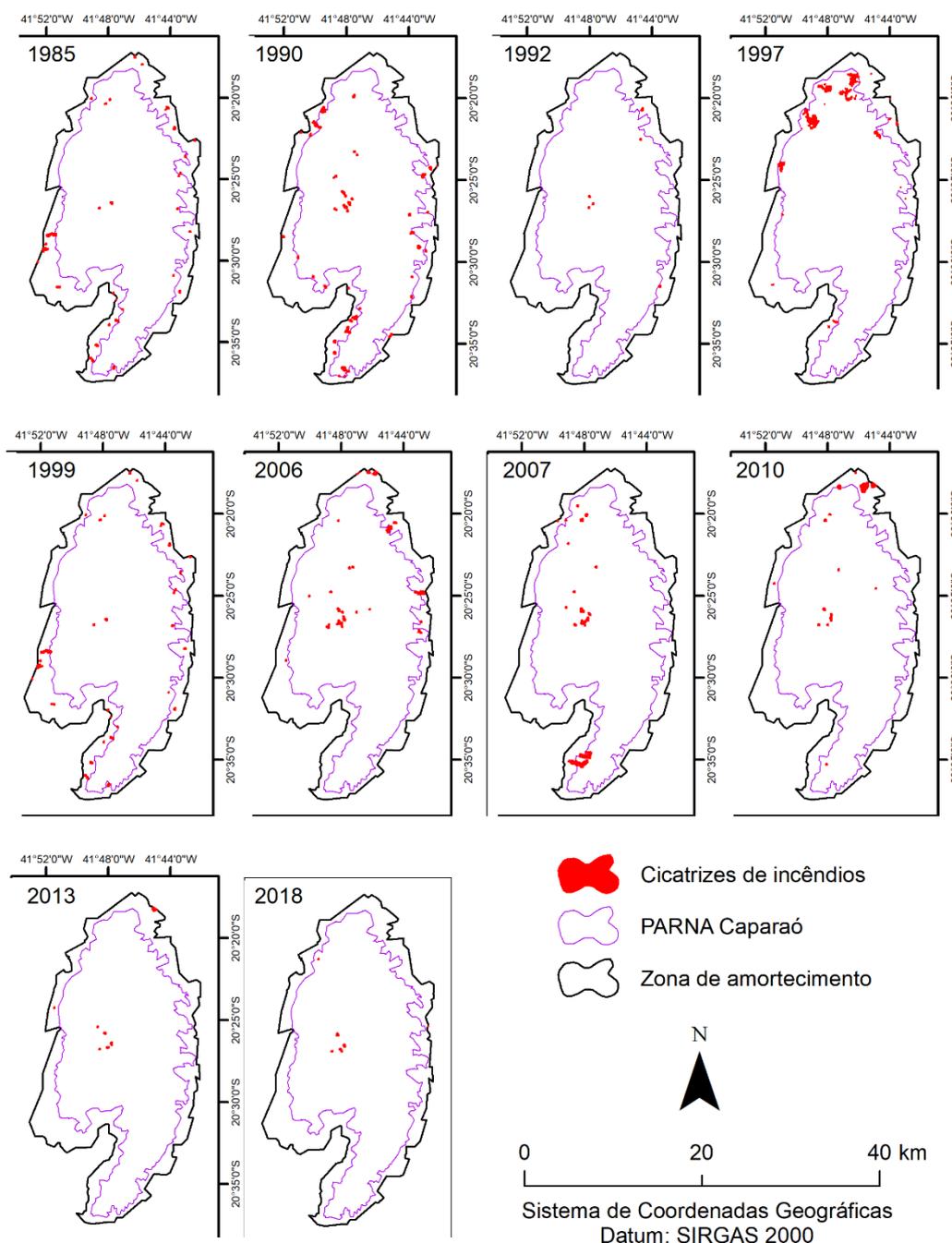


Figura 14. Distribuição espacial das cicatrizes de incêndios florestais ao longo dos 10 anos aleatorizados para validação do modelo.

Fonte: O autor (2022).

Os arquivos de cicatrizes de incêndios representados graficamente na Figura 14, foram utilizados no intuito de validar o modelo de RIF elaborado na presente pesquisa. Todos os dados apresentaram normalidade e homogeneidade de variâncias. Os resultados da análise de variância para a proporção de classes de risco de incêndios florestais nas cicatrizes de incêndios, demonstraram a existência de diferença significativa ao nível de 5% de significância (Tabela 18).

Tabela 18. Análise de variância das classes de risco de incêndios florestais ocorridas sob áreas de cicatrizes de incêndios.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P- valor
Tratamento	4	6,24	1,56	4,87	0,002*
Resíduo	45	14,42	0,32	-	-
Total	49	20,66	-	-	-

Fonte: O autor (2022).

Haja vista que existe diferença significativa entre as médias, procedeu-se com o teste de médias (Tukey a 5%), com o objetivo de proceder com a validação do modelo. Desta forma, a partir dos resultados apresentados na Tabela 19, percebe-se que a classe de risco muito alto foi a mais expressiva no interior das cicatrizes de incêndios em todos os 10 anos estudados.

Tabela 19. Teste de médias da proporção de classes de risco de incêndios florestais ocorridas sob áreas de cicatrizes de incêndios

Classes de Risco	Médias
Muito Baixo	0,54 ab
Baixo	0,06 b
Moderado	0,17 b
Alto	0,63 ab
Muito alto	1,05 a

Médias seguidas de mesma letra não apresentam diferença significativa entre si.

Fonte: O autor (2022).

Como pôde ser visualizado na Tabela 19, as classes de risco muito alto, alto e muito baixo não apresentaram diferença significativa. No entanto, a média mais expressiva foi a de risco muito alto (1,05), evidenciando, portanto, a eficiência do modelo proposto na delimitação do risco de incêndios florestais. A eficiência da metodologia baseada em *Fuzzy* para este fim, também foi evidenciada nos trabalhos de Biazatti et al. (2021), Juvanhol et al. (2021) e Ramalho et al. (2021a; 2021b).

5.2 Áreas prioritárias para a construção de aceiros

A partir dos resultados apresentados na Figura 15, percebe-se que a influência da declividade no modelo de determinação dos locais para construção de aceiros foi uniformemente distribuída por toda a área. No entanto, no interior do PARNA essa influência foi mais evidente no modelo *Fuzzy*, ou seja, nessa região o valor do conjunto

foi mais próximo de 1 que na zona de amortecimento, indicando maior prioridade da construção dos aceiros.

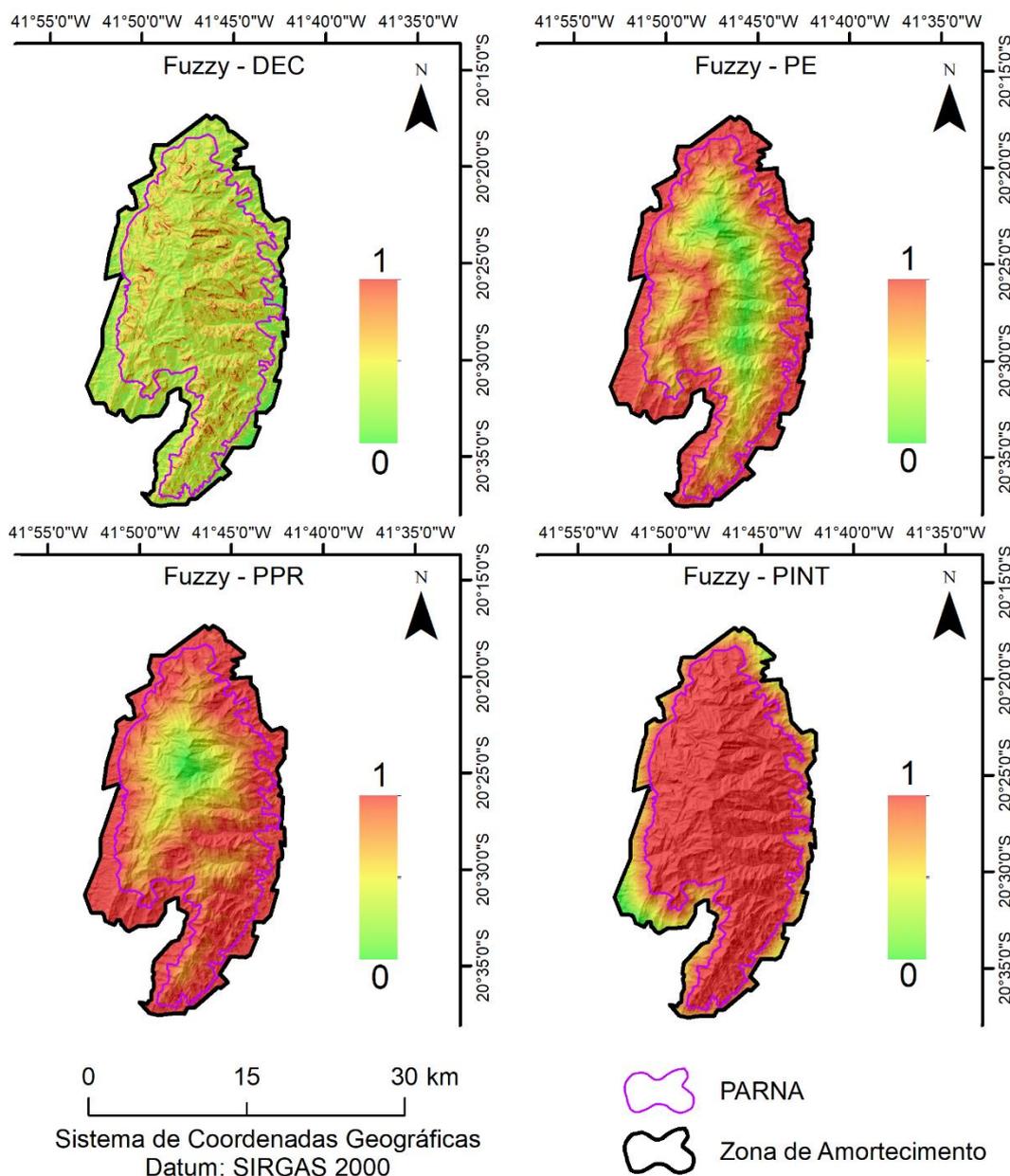


Figura 15. Influência das variáveis sobre a prioridade de construção de aceiros.

Onde, DEC é a declividade, PE é a proximidade de estradas, PPR é a proximidade de propriedades rurais e PINT é a proximidade do interior do PARN Caparaó.

Fonte: O autor (2022).

Esse fato ocorre porque, de acordo com Dennis (2005), os aceiros localizados em áreas com inclinação acentuada, preferencialmente próximos aos topos de morro ou na base das encostas, são mais efetivos que os localizados no meio dos morros. O autor mencionado afirma ainda que a taxa de propagação do fogo é maior à medida que a inclinação do terreno aumenta, isso porque os combustíveis são pré-aquecidos pela coluna de fumaça ascendente pelo contato direto com as chamas.

Desta forma, para evitar a propagação acelerada dos incêndios florestais nessas áreas e assim proteger os recursos ambientais do PARNA Caparaó, é importante proceder com a descontinuidade do material combustível nas regiões de declividade acentuada, através da construção de aceiros, como elucidado nos resultados apresentados na Figura 15.

A influência da proximidade de estradas e das propriedades rurais seguiu o padrão esperado pela distribuição da malha viária apresentada na Figura 5, ou seja, na zona de amortecimento, onde se encontra a maior concentração de estradas e propriedades, os valores *Fuzzy* foram mais próximos de 1. Na parte central do PARNA o comportamento da modelagem foi contrária, ou seja, os valores *Fuzzy* foram mais próximos de zero, indicando que ali existe uma menor densidade de estradas e de áreas rurais antropizadas e que por este motivo, a propensão à instalação dos aceiros é menor.

Sendo assim, o modelo vai ao encontro dos resultados do trabalho de Brandão et al. (2021), que evidenciam os riscos associados à presença de comunidades rurais nas zonas de amortecimento de UC. Isso porque, de acordo com esses autores, as práticas de conversão de áreas nativas em agrícolas ou a renovação de pastagens, muitas vezes realizadas através da queima, oferecem riscos constantes e iminentes aos recursos ambientais a serem protegidos. Assim, a construção de aceiros nos entornos das propriedades agrícolas são técnicas promissoras e essenciais para a proteção do PARNA Caparaó.

Além disso, dado o fato que os aceiros têm a função de proteger os recursos ambientais, principalmente das atividades antrópicas, e fornecer acesso rápido e seguro aos brigadistas, a maior prioridade de construção destes nas regiões próximas às estradas é perfeitamente justificada. Isso porque, de acordo com Tagliarini et al. (2020), a malha viária é o principal meio de acesso a uma dada localidade, permitindo a exploração mais eficiente da região e em contrapartida é considerada como uma das principais responsáveis pela ocorrência dos incêndios, seja devido a incêndios criminosos, prática religiosas ou incêndios causados por cigarros, fogueiras e fagulhas.

Ainda de acordo com os resultados apresentados na Figura 15, a parte central do PARNA Caparaó é praticamente toda coberta pelos valores mais altos do conjunto *Fuzzy*, representando, portanto, maior prioridade de construção de aceiros. Isso decorre do fato que o principal intuito dos aceiros nas proximidades de UC, é a proteção dos recursos ambientais das mesmas. Neste sentido, apenas nas

extremidades da zona de amortecimento os valores do conjunto *Fuzzy* se aproximam de 0, indicando menor prioridade de construção de aceiros.

Na Figura 16 são apresentadas as classes de prioridade de construção de aceiros em toda a área de estudo após a combinação das influências *Fuzzy* das variáveis apresentadas na Figura 15.

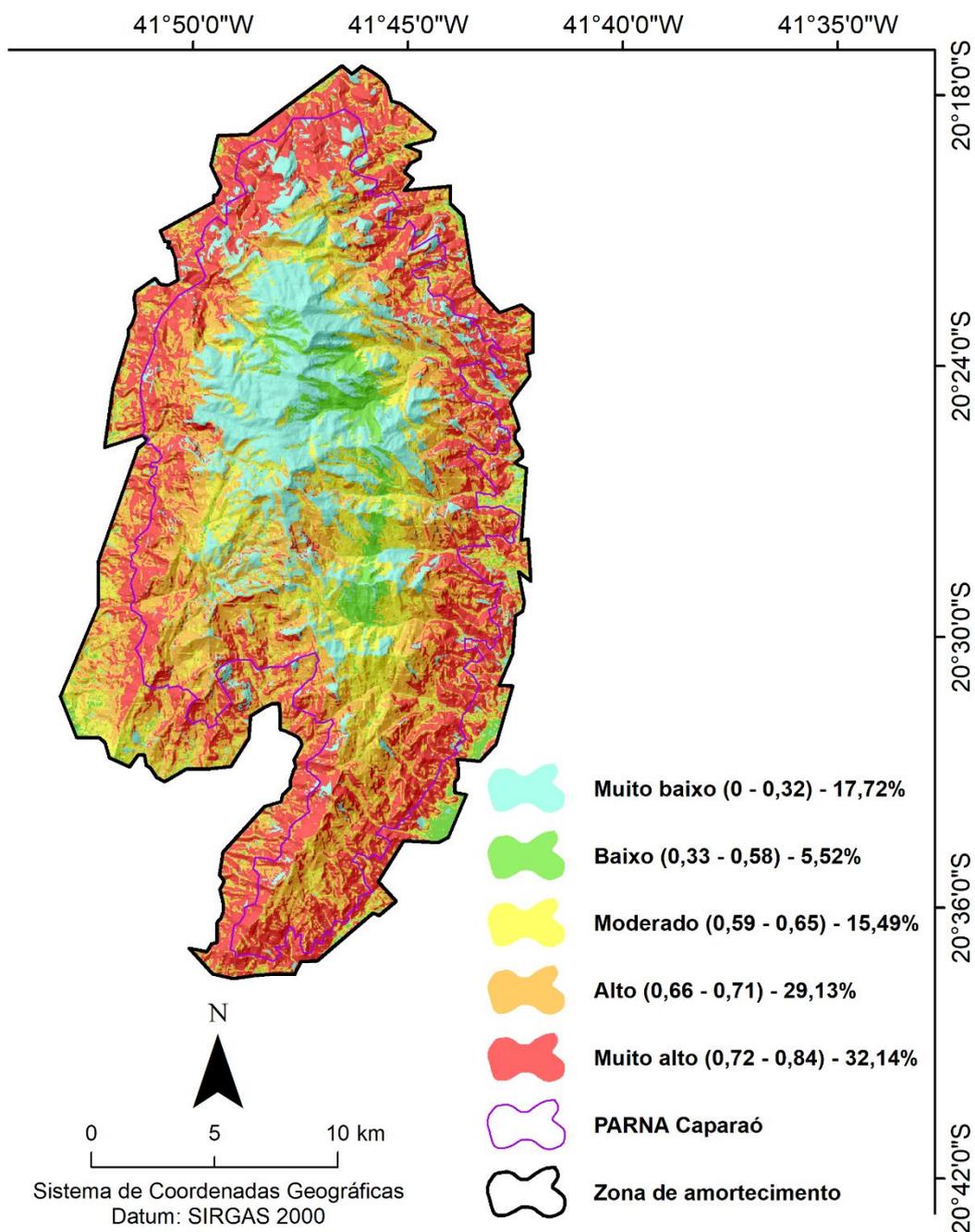


Figura 16. Classes de prioridade de construção de aceiros no Parque Nacional do Caparaó e em sua zona de amortecimento.

Fonte: O autor (2022).

Os resultados apresentados na Figura 16 mostram que as classes de prioridade de construção de aceiros mais representativas na área de estudo são a de muito alta

prioridade (32,14%) e de alta prioridade (29,13%), respectivamente. Essas duas classes, somadas à de prioridade moderada representam 76,76% de toda a área de estudo. Os altos valores dessas classes de prioridade, evidenciam a importância e a necessidade de delimitação ou atualização de planos de prevenção aos incêndios florestais no PARNA, mediante a análise de ambientes prioritários de proteção.

Outro ponto importante a ser observado é que as áreas de maior altitude e conseqüentemente de menor influência antrópica, ou seja, na parte central do Parque, foram as principais responsáveis pela expressividade da classe de prioridade muito baixa (17,72%). Isso ocorre porque de acordo com a Figura 15, essas áreas são as mais distantes das estradas e das propriedades rurais.

No entanto, nesses resultados a restrição de exclusão das áreas impróprias para a construção dos aceiros ainda não havia sido incluída. Desta forma, a Figura 17 apresenta os resultados finais da localização prioritária para a construção dos aceiros após a aplicação da restrição de áreas impróprias e das classes de risco alto e muito alto.

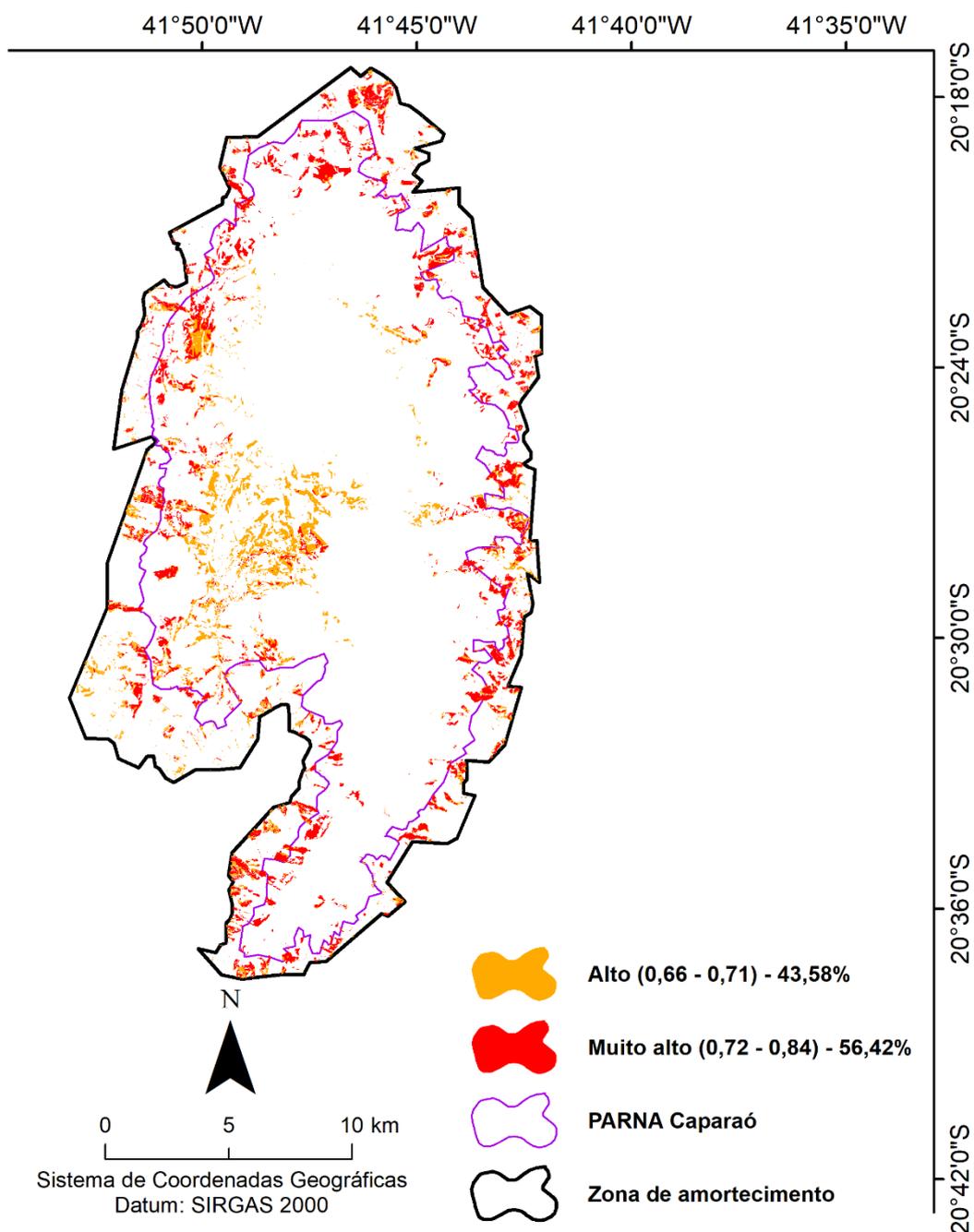


Figura 17. Áreas prioritárias para a construção de aceiros no PARNA Caparaó e na sua ZA após a exclusão das classes impróprias.

Fonte: O autor (2022).

Após a aplicação de todas as restrições, percebe-se mediante a comparação dos resultados apresentados na Figura 16 e na Figura 17 e na Tabela 20, que boa parte das áreas cobertas pelas classes de prioridade alta e muito alta de construção de aceiros foi removida do modelo como área imprópria.

Tabela 20. Proporção de área por classe de prioridade de construção de aceiros.

Restrições de áreas impróprias	Área por classe de prioridade (ha)		Porção da área de estudo por classe de prioridade		
	Alta	Muito alta	Alta	Muito alta	Total
Antes da aplicação	13.149,34	14.504,39	29,13%	32,14%	61,27%
Depois da aplicação	1.921,53	2.487,86	4,26%	5,51%	9,77%
Redução	11.227,81	12.016,53	24,87%	26,63%	51,50%

Fonte: O autor (2022).

Como visto na Tabela 20, após as restrições, 5,51% da área de estudo é composta por classes de prioridade muito alta de construção de aceiros e 4,26% cobertas por classes de prioridade alta. Esses resultados, ainda que pareçam baixos, são extremamente importantes para estabelecer medidas de proteção cada vez mais eficientes do PARNA bem como viabilizar a tomada de decisões quanto à conservação dos recursos naturais da Unidade como um todo.

5.3 Locais ótimos para instalação de torres de monitoramento

A distribuição espacial das torres de monitoramento dos incêndios florestais, bem como a área visualizada pelo conjunto de torres e a localização de cada uma destas para os cenários A1 e A2, estão disponibilizados na Figura 18.

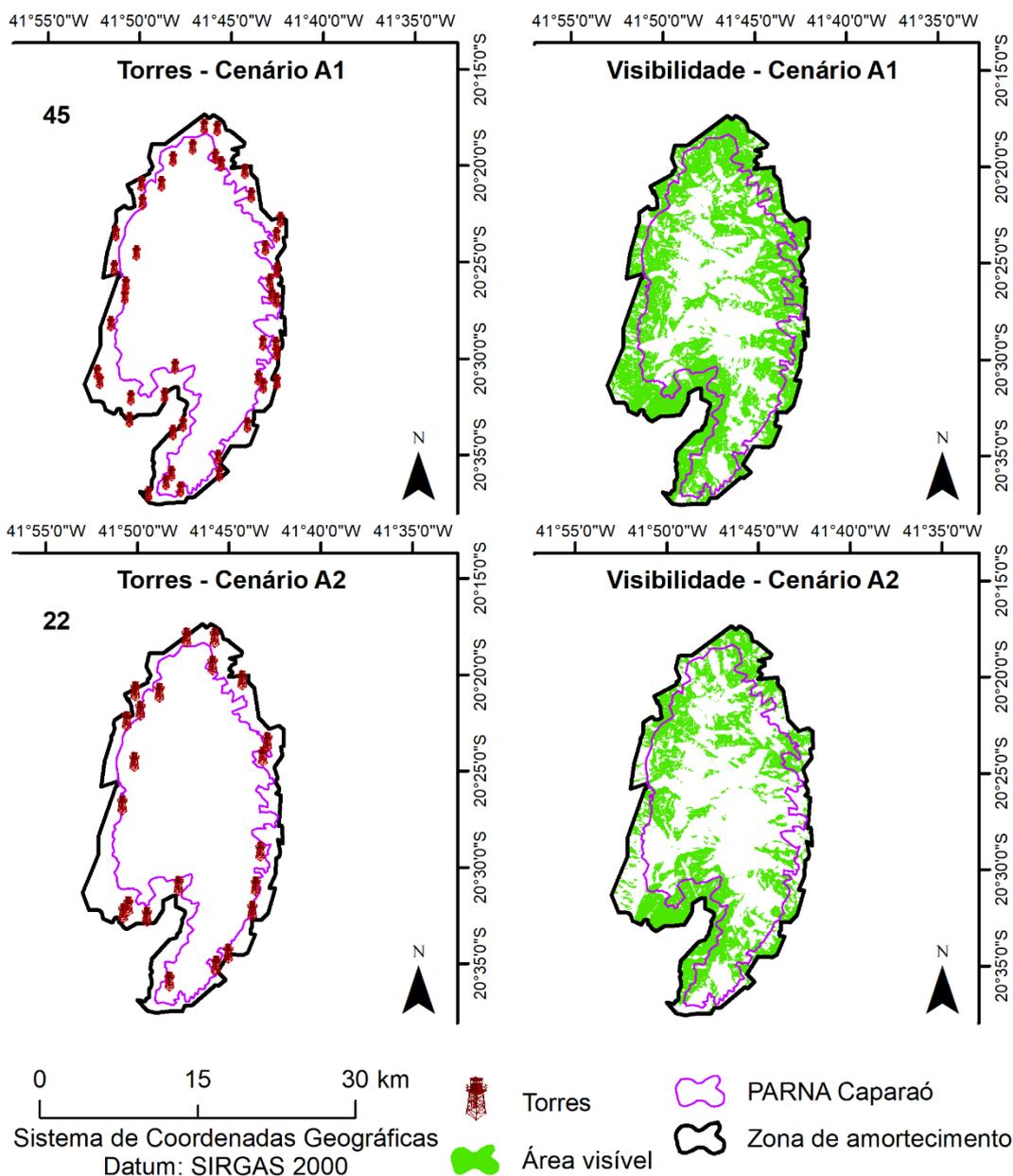


Figura 18. Distribuição espacial das torres de monitoramento de incêndios florestais e das respectivas áreas visualizadas nos Cenários A1 e A2 para a área de estudo.

Fonte: O autor (2022).

Já a Figura 19, apresenta a distribuição espacial das torres de monitoramento dos incêndios florestais, bem como a área visualizada pelo conjunto de torres e a localização de cada uma destas para os cenários B1 e B2.

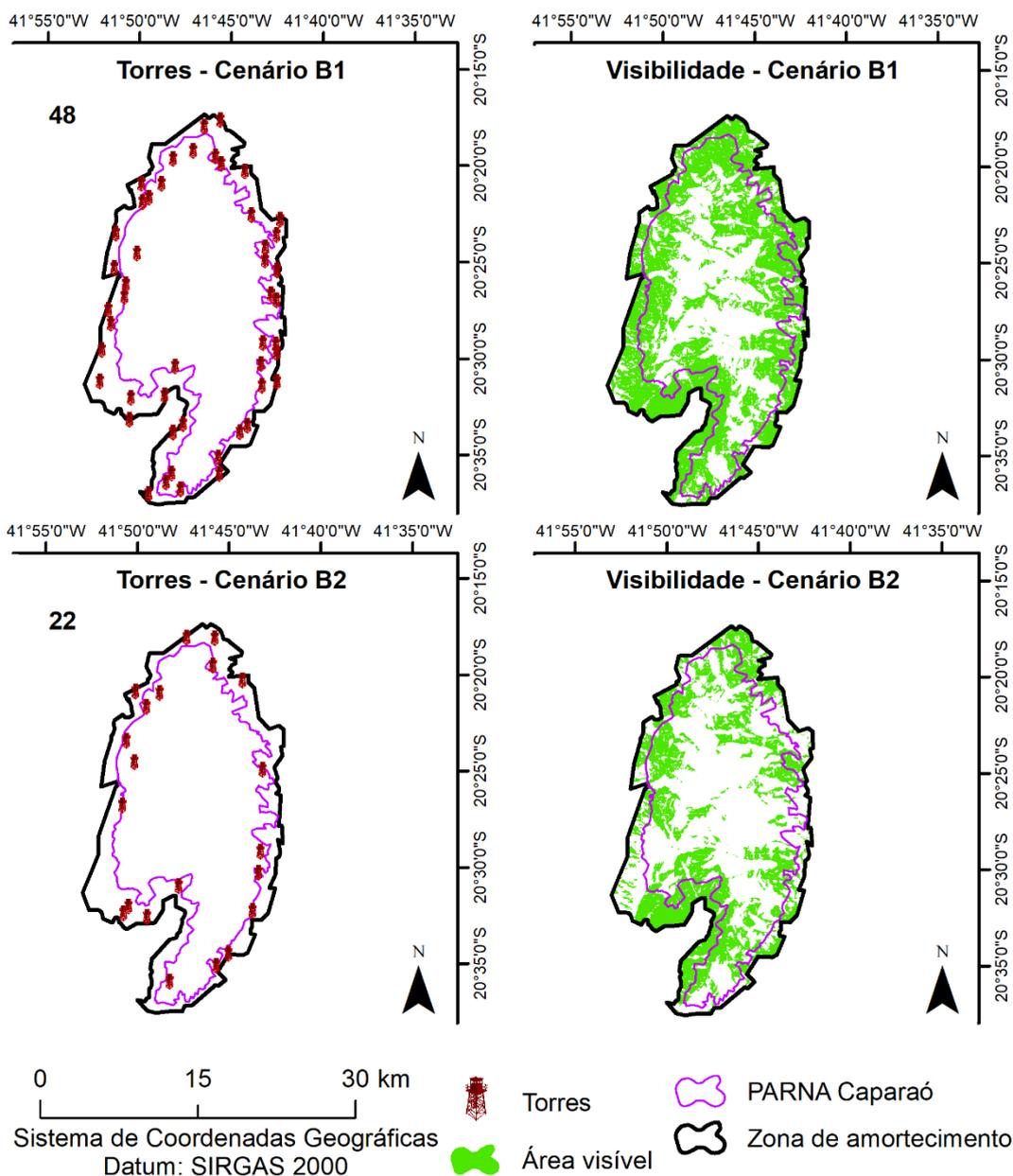


Figura 19. Distribuição espacial das torres de monitoramento de incêndios florestais e das respectivas áreas visualizadas nos Cenários B1 e B2 para a área de estudo.

Fonte: O autor (2022).

A partir dos resultados apresentados nas Figura 18 e Figura 19, é possível perceber que as maiores concentrações de torres de monitoramento encontram-se na zona de amortecimento do PARNA Caparaó. Isso ocorre porque são nessas áreas que se concentram as maiores quantidades de malha viária e de classes de UOT aptas para a sua instalação (eucaliptocultura, cafeicultura, pastagem e solo exposto), como pode ser visualizado na Figura 5.

Outro ponto a ser observado nas Figura 18 e Figura 19, é que a parte central do PARNA não apresentou cobertura uniforme da visualização das torres. Esse fato ocorre porque essas áreas apresentam maiores inclinações e irregularidade no relevo,

fazendo com que o ângulo de visada de cada torre seja comprometido. Na zona de amortecimento, por sua vez, por apresentar menores variações no relevo, como visto na Figura 5, foi constatada uma maior cobertura da visada das torres.

Resultado semelhante foi relatado por Eugenio et al. (2016b), ao avaliarem a localização ótima das torres no estado do Espírito Santo. Nessa pesquisa os autores constataram que em todos os cenários propostos, a área litorânea do estado, por apresentar relevo mais plano, foi a que apresentou maior cobertura da visada das torres. Em contrapartida, os autores identificaram na região do Caparaó, uma redução gradual na capacidade de visualização das torres em decorrência das variações abruptas de relevo.

Apesar de fornecer uma visualização gráfica aprimorada da distribuição das torres na área de estudo, apenas a análise visual dos mapeamentos apresentados nas Figura 18 e Figura 19, a determinação do melhor cenário fica inviabilizado e subjetivo. Portanto, para realizar tal procedimento foi necessário quantificar a área visualizada de cada torre nas classes de risco alto e muito alto de ocorrência de incêndios florestais, que são os principais alvos das torres (Tabela 21).

Tabela 21. Área visualizada por classe de risco de incêndios florestais e quantidade de torres de cada método.

Cenário	Número de torres	Classe de risco	Área visualizada	Área não visualizada
A1	45	Alto	56,47%	18,54%
		Muito alto	19,13%	5,86%
		Total	75,60%	24,40%
A2	22	Alto	34,64%	40,37%
		Muito alto	13,27%	11,72%
		Total	47,91%	52,09%
B1	48	Alto	58,29%	16,73%
		Muito alto	19,02%	5,97%
		Total	77,30%	22,70%
B2	22	Alto	33,76%	41,25%
		Muito alto	12,58%	12,40%
		Total	46,35%	53,65%

Fonte: O autor (2022).

Ao avaliar as informações apresentadas na Tabela 21, percebe-se que os cenários A1 e B1 foram os que apresentaram maior cobertura de área visualizada entre os quatro avaliados, apresentando taxas de, respectivamente 75,60% e 77,31% de visualização das classes de risco de incêndios alto e muito alto. Isso ocorre porque quando se reduz o tamanho das quadrículas torna-se necessário um maior número

destas para cobrir a área. Portanto, dado o fato que cada quadrícula é dotada de uma torre, quanto menor o tamanho destas maior o número de torres e, conseqüentemente, maior a área visualizada. Em contrapartida, os cenários A2 e B2 apresentaram as proporções de áreas não-visualizadas (52,09% e 53,65%, respectivamente) superiores às áreas visualizadas (47,91% e 46,34%, respectivamente).

No entanto, há de se evidenciar que o número de torres dos cenários A2 (22) e B2 (22) foi substancialmente menor que o número de torres dos cenários A1 (45) e B1 (48), sendo uma redução de mais de 50% do número de torres em ambos os cenários. Esses resultados evidenciam uma relação diretamente proporcional entre o número de torres e a quantidade de área visualizada, ou seja, quanto maior o número de torres, maior a quantidade de área visualizada. Essa situação também foi verificada por Eugenio et al. (2016b) e Moreira, Mendes e Santos (2020), quando perceberam que quanto mais elevava-se o número de torres, maior era a cobertura das mesmas e o contrário também se fazia verdadeiro.

Entretanto, Eugenio et al. (2016b) evidencia que essa não é uma relação exata e que deve ser tratada como verdade absoluta em qualquer área de estudo, dado o fato que cada local possui características particulares de altitude, tipo de relevo, uso da terra, áreas de risco, entre outras que podem elevar ou reduzir as áreas visualizadas por cada torre.

De acordo com Soares (1985), uma visualização clara de 100% da área de estudo é consideravelmente dificultada. Por este motivo, o autor determinou uma faixa de visualização entre 70 e 80% da área como sendo satisfatória e eficiente. Sendo assim, analisando a proporção de visualização, pode-se afirmar que os cenários A1 e B1 são os únicos que se enquadram nesse limite de eficiência proposto por Soares (1985).

Uma outra informação importante levantada pelos autores supracitados é o valor da construção de cada torre em agosto de 2016, que atualizando para os valores atuais (junho de 2022) do dólar (R\$ 4,90), ficaria em torno de 150 mil reais. Essa informação, aplicada ao número de torres de cada método resultaria nos valores de implantação apresentados na Tabela 22.

Tabela 22. Custo de implantação e custo por área visualizada em cada cenário

Cenário	Número de torres	Custo de implantação	Área visualizada (ha)	Custo por hectare visualizado
A1	45	R\$ 6.826.625,39	7.950,30	R\$ 858,66
A2	22	R\$ 3.337.461,30	5.038,35	R\$ 662,41
B1	48	R\$ 7.281.733,75	8.130,13	R\$ 895,65
B2	22	R\$ 3.337.461,30	4.873,24	R\$ 684,85

Fonte: O autor (2022).

Como visto na Tabela 22, quando se deseja realizar a visualização de uma maior porção da área, como no caso dos cenários A1 e B1, é preciso que o investimento inicial seja maior. Nesses casos, cada hectare visualizado careceu de um custo inicial de R\$ 858,66 (A1) e R\$ 895,65 (B1), que é um custo próximo ao encontrado por Eugenio et al. (2016b), por exemplo, que nos valores atuais, seria de R\$ 679,11 por hectare visualizado. No entanto, no trabalho realizado pelos autores mencionados, foi considerada a visualização de todas as classes de risco.

Sendo assim, os cenários A1 e B1 foram considerados os mais vantajosos para o PARNA Caparaó, haja vista que apresentaram níveis de visualização acima de 70% e o valor por hectare visualizado não apresentou variação discrepante entre eles. No entanto, o valor de implantação do B1 foi mais alto. Desta forma, ainda que o método B1 tenha apresentado melhor taxa de visualização, é preciso que no planejamento de proteção do PARNA Caparaó contra os incêndios florestais leve em consideração o poder aquisitivo e as realidades financeiras do Parque para selecionar um desses dois métodos.

5.4 Áreas aptas para instalação de reservatórios de água

Um planejamento espacial otimizado considerando a localização eficiente dos recursos disponíveis em regiões que permitam o acesso de veículos em situações de emergência é fundamental. Esse tipo de planejamento, como mencionado na metodologia proposta por Ramalho et al. (2021b), deve levar em consideração as variáveis de declividade (em função da facilidade de instalação), UOT (para evitar seleção de áreas inviáveis de se instalar os reservatórios), proximidade de cursos d'água (no intuito de proporcionar reabastecimento facilitado dos reservatórios) e proximidade de estradas (facilitar a aproximação e abastecimento dos veículos de combate).

Sendo assim, na Figura 20 é apresentada a influência de cada uma dessas variáveis na modelagem de determinação de áreas aptas para instalação de reservatórios de água.

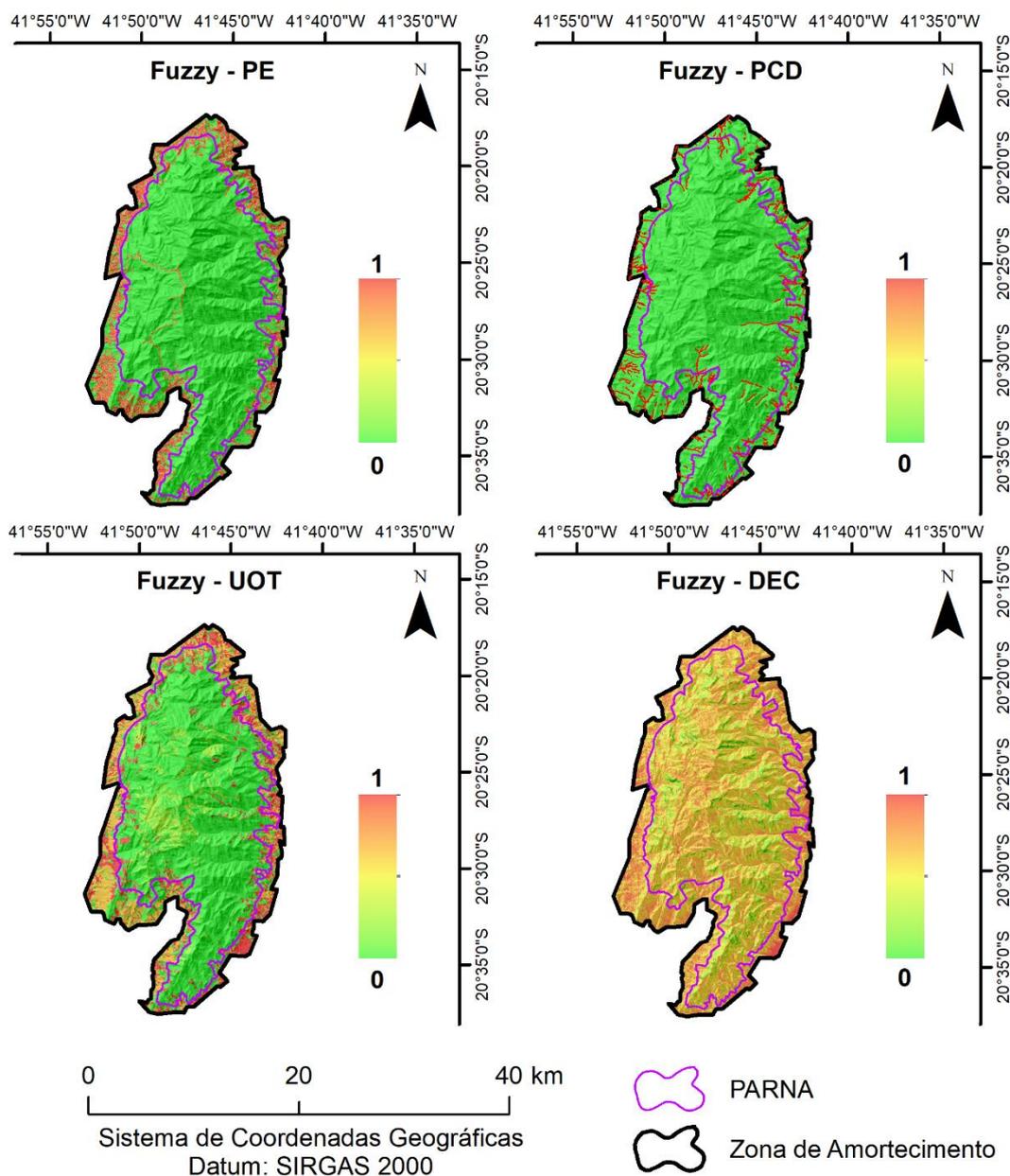


Figura 20. Influência das variáveis sobre a aptidão à instalação de reservatórios de água para combate aos incêndios florestais no PARNA Caparaó e sua zona de amortecimento.

Onde o PE é a proximidade de estradas, PCD é a proximidade de cursos d'água, UOT é o uso e ocupação da terra e DEC é a declividade.

Fonte: O autor (2022).

Percebe-se, a partir os resultados apresentados na Figura 20, que as variáveis de proximidade de estradas e uso e ocupação da terra apresentam valores mais altos

do conjunto *Fuzzy* (mais próximos a 1) de propensão à instalação dos reservatórios na zona de amortecimento. Isso ocorre porque são nessas áreas que se concentram as maiores quantidades de malha viária e de classes de UOT mais aptas para a sua instalação, como pode ser visualizado na Figura 5. A declividade, por sua vez, apresenta uma distribuição uniforme de aptidão por toda a área de estudo, fornecendo maior proporção de valores próximos a 1 no conjunto *Fuzzy*.

O resultado dessas variáveis integradas é o zoneamento de aptidão à instalação dos reservatórios de água para combate aos incêndios florestais apresentados na Figura 21.

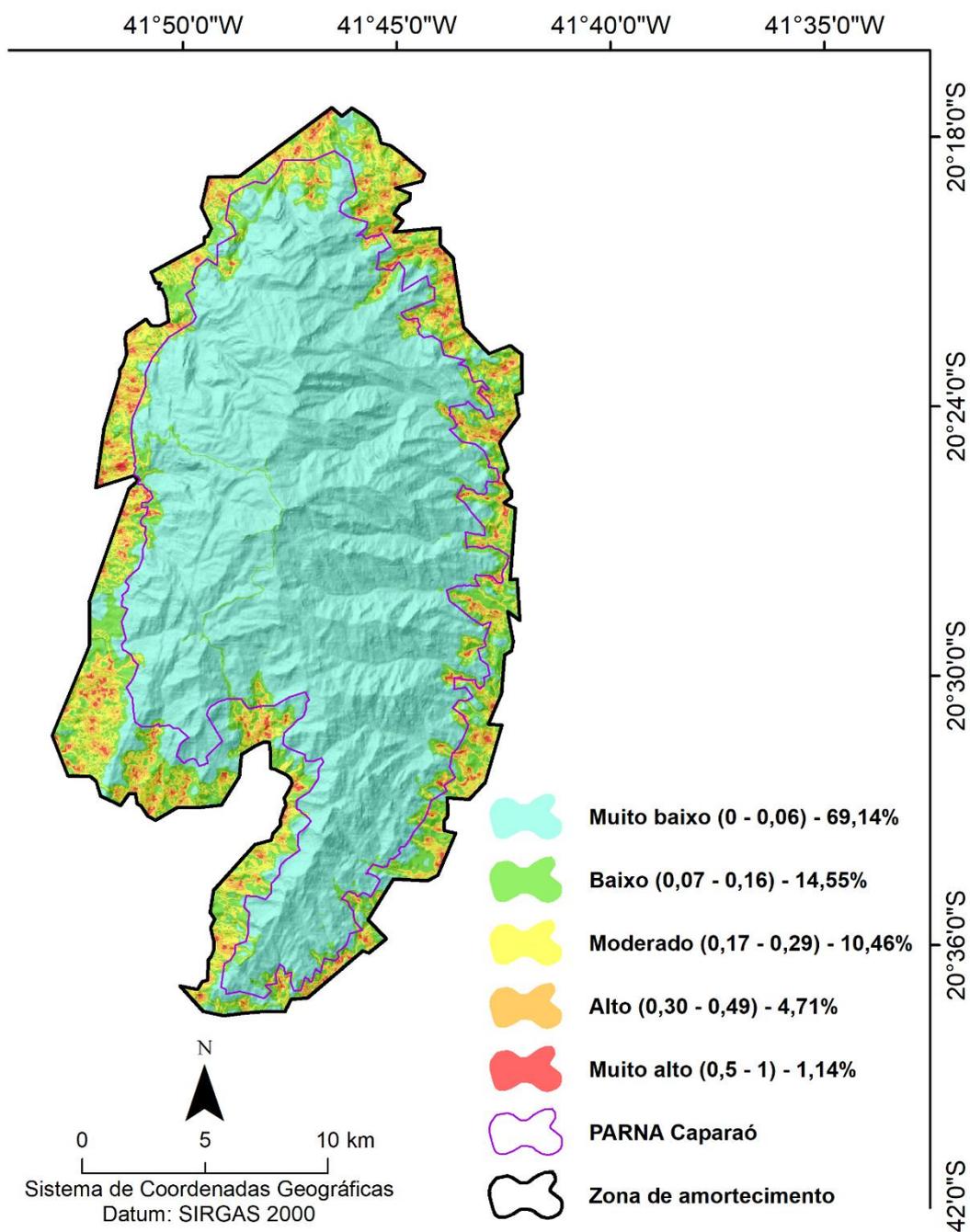


Figura 21. Zoneamento de aptidão à instalação de reservatórios de água para combate aos incêndios florestais no PARNA Caparaó e em sua ZA.

Fonte: O autor (2022).

Os resultados apresentados na Figura 21 mostram que as classes de aptidão de instalação dos reservatórios de água mais representativas na área de estudo são a de muito baixa (69,14%) e de baixa aptidão (14,55%), respectivamente. Essas duas classes, somadas à de aptidão moderada representam 94,15% de toda a área de estudo. Os altos valores dessas classes de prioridade, evidenciam que a área apresenta pontos específicos de aptidão à instalação dos reservatórios, principalmente em sua zona de amortecimento.

Outro ponto importante a ser observado é que as áreas no interior do PARNA, onde a cobertura da terra é constituída, majoritariamente, por mata nativa e rocha nua, ou seja, áreas inviáveis de se alocar reservatórios de água, são compostas pela classe de aptidão muito baixa.

Devido à baixa proporção de áreas passíveis de instalação de reservatórios de água, o número de reservatórios para atender a toda a área de risco foi consideravelmente alto no combate terrestre. Por este motivo, constatou-se que o custo econômico e ambiental associado à construção de reservatórios de água realmente eficazes, para atender tanto veículos terrestres quanto aeronaves, como ocorre na modelagem proposta na presente pesquisa, inviabiliza o atendimento a 100% das ocorrências, obrigando, portanto, a escolha por cenários que atendam perfeitamente à maior quantidade de área possível.

Um ponto importante a ser mencionado é que não foram identificadas diferenças entre o número de reservatórios em função do tempo de ataque em nenhum dos tratamentos (Tabela 23). Desta forma, na discussão serão abordados os resultados de cada um dos cenários de porcentagem de atendimento da demanda (100%, 90%, 80% e 70%) para cada modelo de combate (terrestre e aéreo).

Tabela 23. Resultados da otimização de locais ótimos para a instalação de reservatórios de água em cada um dos cenários propostos.

Combate com veículos terrestres					Combate com aeronaves				
100%					100%				
Ofertas	Tempo (min)	Demanda atendida	Demanda total	%	Ofertas	Tempo (min)	Demanda atendida	Demanda total	%
724	20	1.545	1.545	100,00	42	20	1.677	1.677	100,00
724	15	1.545	1.545	100,00	42	15	1.677	1.677	100,00
724	10	1.545	1.545	100,00	42	10	1.677	1.677	100,00
724	5	1.545	1.545	100,00	42	5	1.677	1.677	100,00
90%					90%				
Ofertas	Tempo (min)	Demanda atendida	Demanda total	%	Ofertas	Tempo (min)	Demanda atendida	Demanda total	%
251	20	1.394	1.545	90,23	31	20	1.550	1.677	92,43
251	15	1.394	1.545	90,23	31	15	1.550	1.677	92,43
251	10	1.394	1.545	90,23	31	10	1.550	1.677	92,43
251	5	1.394	1.545	90,23	31	5	1.550	1.677	92,43
80%					80%				
Ofertas	Tempo (min)	Demanda atendida	Demanda total	%	Ofertas	Tempo (min)	Demanda atendida	Demanda total	%
126	20	1.237	1.545	80,06	27	20	1.350	1.677	80,50
126	15	1.237	1.545	80,06	27	15	1.350	1.677	80,50
126	10	1.237	1.545	80,06	27	10	1.350	1.677	80,50
126	5	1.237	1.545	80,06	27	5	1.350	1.677	80,50
70%					70%				
Ofertas	Tempo (min)	Demanda atendida	Demanda total	%	Ofertas	Tempo (min)	Demanda atendida	Demanda total	%
80	20	1.086	1.545	70,29	24	20	1.200	1.677	71,56
80	15	1.086	1.545	70,29	24	15	1.200	1.677	71,56
80	10	1.086	1.545	70,29	24	10	1.200	1.677	71,56
80	5	1.086	1.545	70,29	24	5	1.200	1.677	71,56

Fonte: O autor (2022).

É possível perceber que o combate por veículos terrestres não foi suficiente para atender toda a demanda (1.677 pontos) nos tempos determinados. Desta forma, foi possível afirmar que o combate terrestre, sozinho, só é capaz de atender 92,13% da demanda (1.545 pontos). Assim, na Figura 22, são apresentados os resultados associados aos pontos de demanda a serem atendidos pelos reservatórios (pontos de oferta).

PONTOS DE DEMANDA ATENDIDAS

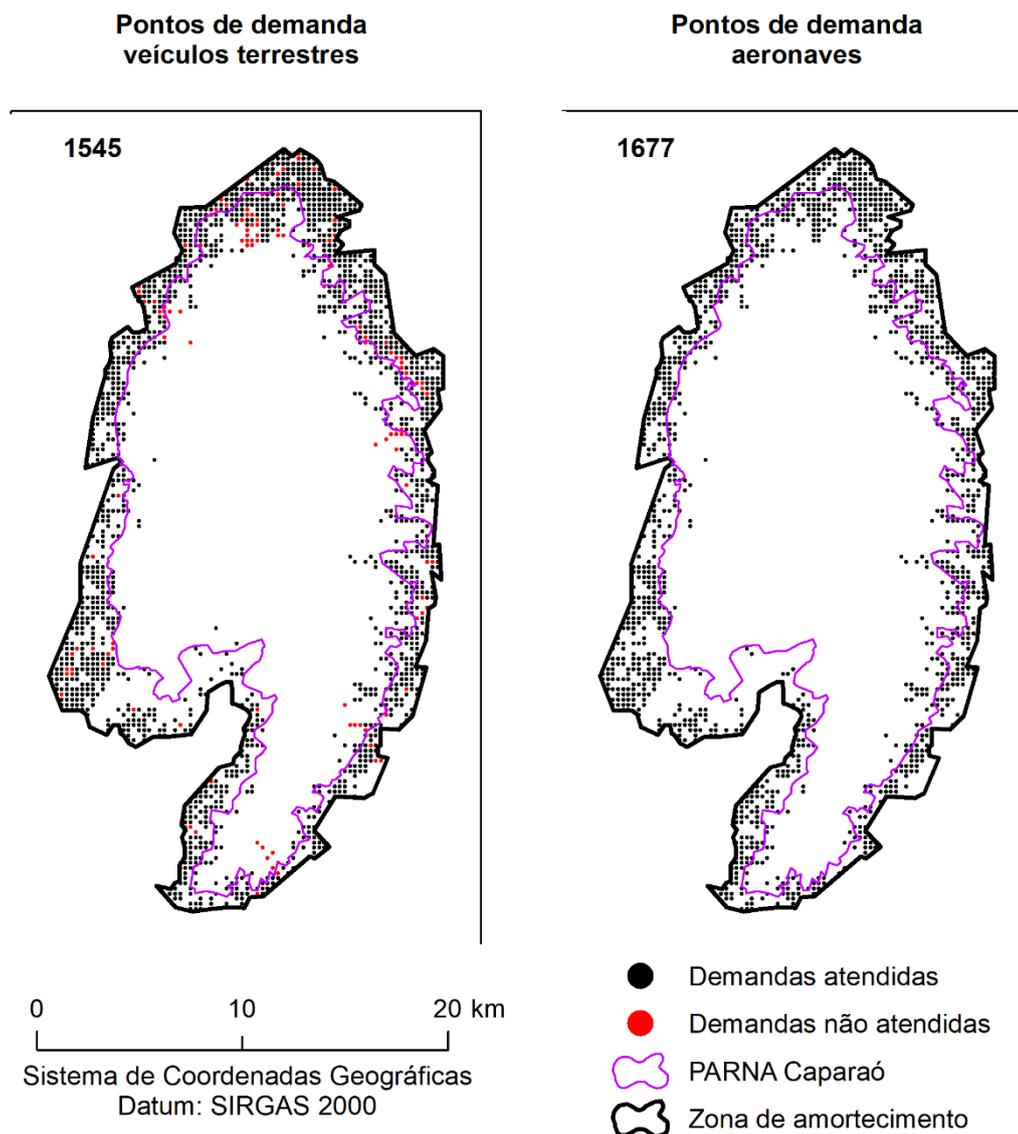


Figura 22. Pontos de demanda atendidos pelos veículos de combate terrestre e pelos veículos de combate aéreo.

Fonte: O autor (2022).

Além disso, ainda que o atendimento da demanda por veículos terrestres seja reduzido, o número de reservatórios necessários para atendê-la por este método foi substancialmente superior ao número necessário para o combate aéreo. Na Figura 23, é possível visualizar a distribuição espacial e a quantidade de reservatórios

necessários para o atendimento de 100%, 90%, 80% e 70% da demanda por veículos terrestres.

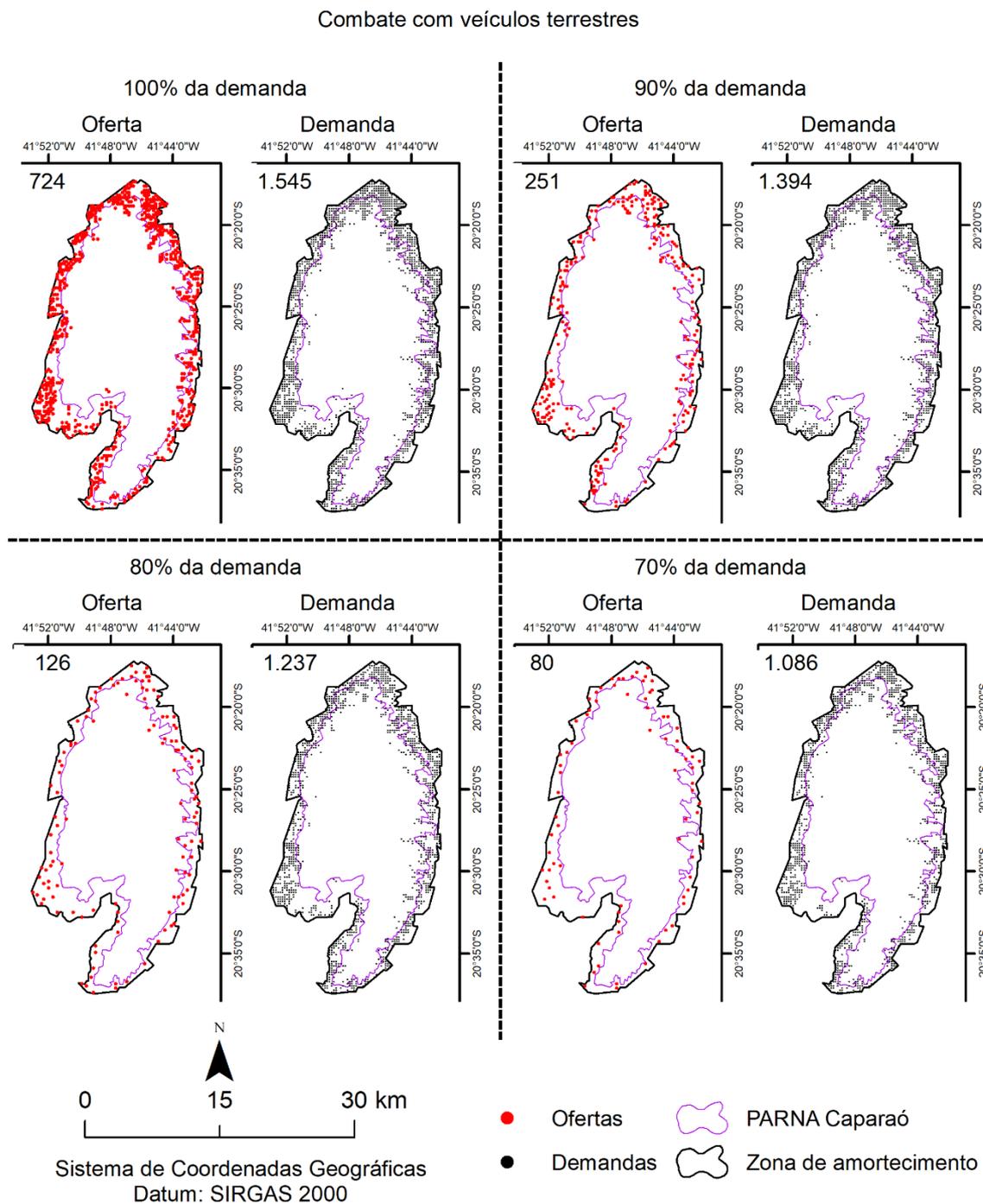


Figura 23. Distribuição espacial e a quantidade de reservatórios necessários para o atendimento da demanda de 100%, 90%, 80% e 70% através de veículos terrestres. Fonte: O autor (2022).

A partir dos resultados apresentados na Figura 23 percebe-se que à medida que se reduziu a capacidade de atendimento da demanda, o número de reservatórios também foi substancialmente reduzido. A redução dos reservatórios para atendimento

de 1.545 pontos de demanda (724 reservatórios) para o atendimento de 1.086 pontos de demanda (80 reservatórios) foi de mais de 88%.

No trabalho de Ramalho et al. (2021b), os autores encontraram um total de 33 reservatórios para atendimento de 675 pontos de demanda em 5 minutos e 18 reservatórios para atender 686 pontos de demanda. O que justifica essa diferença no número de reservatórios é o tamanho da área, que no trabalho de Ramalho et al. (2021b) corresponde a 28,8% da área de estudo da presente pesquisa. Além disso, a densidade de estradas por hectares ($\text{km}\cdot\text{ha}^{-1}$) da área de estudo dos referidos autores é superior à da presente pesquisa, sendo a deles 8,29 km de estrada a cada 100 hectares e do PARNA Caparaó de 3,31 km de estrada a cada 100 hectares.

Devido a essas limitações da área de estudo, foi proposta a instalação de reservatórios para atender às demandas do PARNA Caparaó através de aeronaves, como apresentado na Figura 24.

Combate com aeronaves

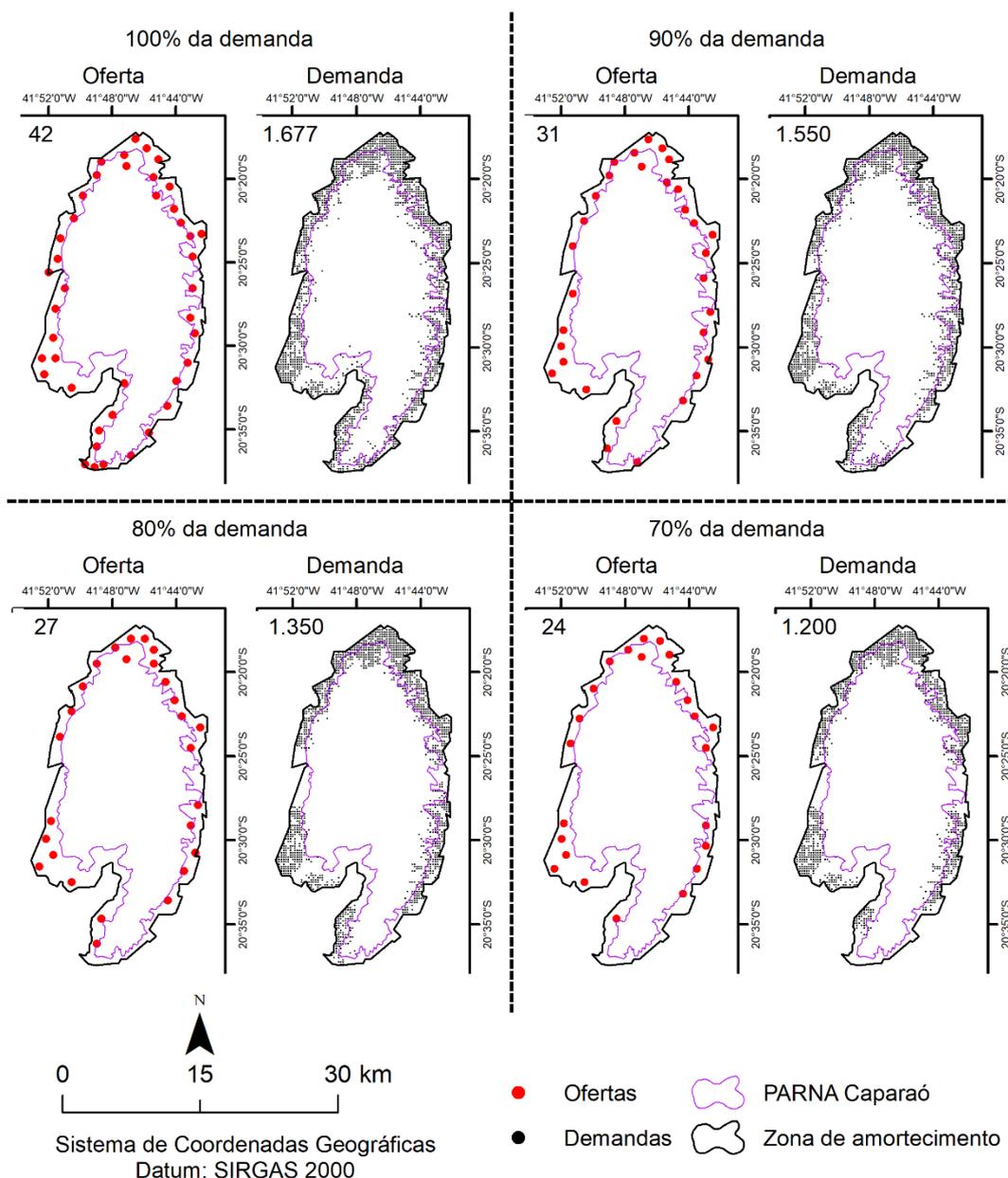


Figura 24. Distribuição espacial e a quantidade de reservatórios necessários para o atendimento da demanda de 100%, 90%, 80% e 70% através de aeronaves.

Fonte: O autor (2022).

A primeira informação importante a se considerar na Figura 24 é que o combate realizado por meio de aeronaves, ao contrário do combate com veículos terrestres, foi capaz de atender aos 1.677 pontos de demanda da área de estudo. Isso foi possível porque a malha aeroviária proposta e apresentada na Figura 10, cobre toda a área de estudo, possibilitando, portanto, o atendimento a todos os pontos de demanda, independentemente da distância da malha viária.

Além disso, a malha aeroviária apresentou uma densidade de vias de 8,05 km a cada 100 hectares. Esse valor é 2,4 vezes superior ao da malha terrestre, o que

culminou, portanto, em uma melhor taxa de atendimento/reservatório no combate aéreo em todos os cenários de atendimento, como pode ser visto na Tabela 24.

Tabela 24. Taxa de atendimento à demanda por reservatório de água.

Tipo de combate	Taxa de atendimento à demanda	Taxa de atendimento por reservatório
Terrestre	100%	2,14
Aéreo		39,93
Terrestre	90%	5,55
Aéreo		50
Terrestre	80%	9,82
Aéreo		50
Terrestre	70%	13,57
Aéreo		50

Fonte: O autor (2022).

As potencialidades do uso de helicópteros no apoio ao combate dos incêndios florestais tornam essa prática promissora, como mostram os resultados apresentados na presente pesquisa. Isso, porque com o uso dos helicópteros proporciona um ataque inicial mais ativo e veloz, podendo evitar que pequenos focos de incêndio se tornem eventos de grandes intensidades e proporções catastróficas, como afirmam Marchi et al. (2014).

Quando se comparam os resultados do número de reservatórios necessários para o combate aéreo, percebe-se que um total de 42 reservatórios foi suficiente para atender todos os 1.677 pontos de demanda. Esse foi considerado o melhor resultado relativo de atendimento, no entanto, com 31 reservatórios, o combate aéreo foi capaz de atender um número maior que os 724 reservatórios necessários para o atendimento por combate terrestre.

Uma pesquisa de mercado realizada com a empresa ZANOM (2022), apontou que o valor médio de um reservatório de água tipo taça coluna molhada com 2,5 metros de diâmetro (modelo que possibilita utilizar a água reservada na parte superior do reservatório – por helicópteros, por exemplo – ou por bombas de água na base – para abastecimento de veículos terrestres) (Figura 25) custa em média R\$29.000,00.



Figura 25. Reservatório tipo taça coluna molhada.

Fonte: ZANOM (2022).

Sendo assim, a Tabela 25 apresenta resultados acerca da relação entre preço e capacidade de atendimento em cada um dos cenários avaliados.

Tabela 25. Custo de implantação e custo por área atendida em cada cenário.

Tipo de combate	Taxa de atendimento	Número de reservatórios	Custo de implantação (R\$)	Área atendida (ha)	Custo por hectare atendido (R\$.ha ⁻¹)
Terrestre	100%	724	20.996.000,00	10.516,27	1.996,53
Aéreo		42	1.218.000,00		115,82
Terrestre	90%	251	7.279.000,00	9.464,64	769,07
Aéreo		31	899.000,00		94,99
Terrestre	80%	126	3.654.000,00	8.413,02	434,33
Aéreo		27	783.000,00		93,07
Terrestre	70%	80	2.320.000,00	7.361,39	315,16
Aéreo		24	696.000,00		94,55

Fonte: O autor (2022).

É notório e consentido a preocupação em relação ao dispêndio de capital para a introdução de um eficiente sistema de combate aos incêndios florestais baseado unicamente em helicópteros, principalmente quando se trata de uma área de domínio público e sem fins lucrativos, como é o caso do PARNA Caparaó. No entanto, percebe-se na Tabela 25, que quando se deseja realizar o atendimento de uma área com veículos terrestres, é preciso que o investimento inicial para a construção dos reservatórios seja consideravelmente maior. Nesses casos, cada hectare visualizado careceu de um custo inicial de até R\$1.996,53, que comparado ao custo de implantação para o combate com helicópteros (R\$115,82), é um custo demasiadamente alto.

5.5 Sugestões de pesquisa

Recomenda-se, para futuras pesquisas, os seguintes temas:

1) Análise técnica e econômica de sistemas de detecção de incêndios por meio de rede de sensores sem fio, com o intuito de aumentar a visibilidade das áreas de risco de incêndios em Unidades de Conservação;

2) Análise da potencialidade de utilização de sistemas de combate híbridos, ou seja, utilizando veículos terrestres em conjunto com aeronaves no intuito de reduzir custos de aquisição dos veículos sem reduzir a eficiência do combate.

6. CONCLUSÕES

- A modelagem *Fuzzy* mostrou-se eficiente no zoneamento de risco de incêndios florestais, apresentando as maiores médias de assertividade nas classes de risco alto e muito alto em relação às áreas queimadas no conjunto aleatório nos anos avaliados;
- Apesar de o Parque Nacional do Caparaó não apresentar riscos críticos de ocorrência de incêndios, as classes de risco mais altos na zona de amortecimento evidenciam a necessidade de medidas de prevenção e controle dos incêndios florestais;
- As áreas prioritárias para a construção de aceiros seguiram os padrões apresentados pelas classes de risco alto e muito alto de ocorrência de incêndios, localizando-se, majoritariamente, na zona de amortecimento;
- A metodologia proposta permite a determinação dos locais mais críticos onde os aceiros devem ser construídos ao mesmo tempo que se prioriza a manutenção das características naturais das áreas de interesse;
- Os cenários A1 e B1 de alocação de torres foram os mais vantajosos para o Parque Nacional do Caparaó, por apresentaram níveis de visualização acima de 70% e custo por hectare visualizado semelhante;
- A análise de redes mostrou-se eficiente na determinação dos locais ótimos de alocação de reservatórios de captação de água, no entanto, evidenciou a fragilidade de acessos terrestres ao Parque Nacional do Caparaó;
- A implantação de reservatórios para combate terrestre apresentou valores muito altos de pontos de oferta e não foi capaz de atender a todos os pontos de demanda.
- Os reservatórios para combate aéreo foram mais eficientes, pois demandaram respectivamente, 42 unidades para atender todos os pontos necessários e 31 para atender 90% da demanda;
- Todas as metodologias apresentadas forneceram subsídios para a criação de medidas e planos prioritários de predição, prevenção, monitoramento e combate aos incêndios florestais, sendo viáveis, aplicáveis, replicáveis e ajustáveis a quaisquer outras unidades de conservação e áreas de interesse econômico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDI GHESHLAGHI, H.; FEIZIZADEH, B.; BLASCHKE, T. GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and *Fuzzy* logic. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 63, n. 3, p. 481–499, 2020.

AJIN, R. S. et al. The Risk Assessment Study of Potential Forest Fire in Idukki Wildlife Sanctuary using RS and GIS Techniques. **International Journal of Advanced Earth Science and Engineering**, v. 5, n. 1, p. 308–318, 2016.

AKAY, A. E. et al. A GIS-based decision support system for determining the shortest and safest route to forest fires: A case study in Mediterranean Region of Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 3, p. 1391–1407, 2012.

ALMEIDA, A. DE P. **As Unidades de Conservação Federais do Espírito Santo**. Rio de Janeiro, RJ: ICMBio, 2013.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, M. M.; MATRICARDI, E. A. T.; PEREIRA, R. S. Dinâmica espaço-temporal do fogo entre 1999 a 2009 no Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, p. 752–768, 2013.

AMRAOUI, M. et al. Atmospheric conditions associated with extreme fire activity in the Western Mediterranean region. **Science of the Total Environment**, v. 524–525, p. 32–39, 2015.

ANA. **Catálogo de Metadados da ANA**. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c>>. Acesso em: 10 jun. 2022a.

ANA. **Catálogo de Metadados da ANA**. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/9e7e1384-6f05-4400-879f-af714e9ab740>>. Acesso em: 2 abr. 2022b.

ASSIS, F. R. V. DE et al. Uso de geotecnologias na locação espacial de torres para detecção de incêndios florestais no Semiárido nordestino. **Floresta**, v. 44, n. 1, p. 133–142, 8 jan. 2014.

AXIMOFF, I. A.; MENNA BARRETO, L. A.; KURTZ, B. C. Ações Cooperativas para Prevenção e Combate a Incêndios Florestais em Área Protegida Urbana na Cidade do Rio de Janeiro. **Biodiversidade Brasileira - BioBrasil**, v. 10, n. 2, p. 96–109, 2020.

- BAJCSY, R.; KOVAČIČ, S. Multiresolution elastic matching. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 46, n. 1, p. 1–21, 1989.
- BARANE, P.; DWARAKISH, G. S. **Plugins QGIS**. Disponível em: <https://plugins.qgis.org/plugins/NITK_RS-GIS_17/>. Acesso em: 2 abr. 2022.
- BARRADAS, A. C. S. et al. Paradigmas da Gestão do Fogo em Áreas Protegidas no Mundo e o Caso da Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins. **BioBrasil**, v. 10, n. 2, p. 71–86, 2020.
- BATALHA, M. P. R.; DELPUPO, K. K.; FARIA, A. L. L. O uso de SIG na identificação das principais feições do relevo da porção mineira do Parque Nacional do Caparaó, Zona da Mata - MG. **REVISTA GEONORTE**, v. 10, n. 1, p. 283–290, 2014.
- BIAZATTI, L. D. et al. Mapping the risk of forest fires in the Rio Preto National Forest in the Atlantic Forest. **Floresta**, v. 54, n. 4, p. 1062–1072, 2021.
- BLIŠŤAN, P.; KOVANIČ, L.; KOVANIČOVÁ, M. The importance of Geographic Information Systems education at universities in the process of building a European knowledge-based society. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 195, p. 2458 – 2462, 2015.
- BONORA, L. et al. Wildfire Occurrence: Integrated Model for Risk Analysis and Operative Suppression Aspects Management. **American Journal of Plant Sciences**, v. 4, p. 705–710, 2013.
- BRANDÃO, M. L. S. M. et al. O papel das zonas de amortecimento na efetividade da proteção ambiental da Floresta Nacional de Palmares, Piauí, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 4, p. 1789–1811, 2021.
- BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Presidência da República - Casa Civil**, Brasília: DF, 2000.
- BUI, D. T. et al. A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-Fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 233, p. 32–44, 2017.
- BUI, D. T.; VAN LE, H.; HOANGD, N.-D. GIS-based spatial prediction of tropical forest fire danger using a new hybrid machine learning method. **Ecological Informatics**, v. 48, p. 104–116, 2018.

BYRAM, G. M. Combustion of forest fuels. In: DAVIS, K. P.; BYRUM, G.; KRUMM, W. R. (Eds.). **Forest Fire: Control and Use**. 1. ed. New York: NY: McGraw Hill, 1959. p. 77–84.

CAMARGO, L. S. et al. Map of areas susceptible to forest fires in the municipality of Petrópolis– RJ | Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Incêndios Florestais do Município de Petrópolis – RJ. **Anuario do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 630–641, 2019.

CANZIAN, W. P. et al. Análise de causa e influência de elementos meteorológicos em ocorrências de incêndios em florestas de produção. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 835–844, 2020.

CANZIAN, W. P. et al. Eficiência Do Uso Da Água Em Métodos De Combate a Incêndios Em Florestas Plantadas. **Nativa**, v. 6, n. 3, p. 309, 2018.

CASTILLO SOTO, M. E. The identification and assessment of areas at risk of forest fire using *Fuzzy* methodology. **Applied Geography**, v. 35, n. 1–2, p. 199–207, 2012.

ÇOLAK, E.; SUNAR, F. Evaluation of forest fire risk in the Mediterranean Turkish forests: A case study of Menderes region, Izmir. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 45, n. January, p. 101479, 2020.

CONAMA. Resolução nº 428, de 17 de dezembro de 2010: Dispõe, no âmbito do licenciamento ambiental sobre a autorização do órgão responsável pela administração da Unidade de Conservação (UC), de que trata o § 3º do artigo 36 da Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000. **Ministério do Meio Ambiente**, Brasília: DF, 2010.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO MATO GROSSO. Noções básicas de operações aéreas aplicado aos incêndios florestais. In: GROSSO, C. DE B. M. DO M. (Ed.). **Prevenção e combate a incêndios florestais**. 1. ed. Cuiabá, MT: Corpo de Bombeiros Militar do Mato Grosso, 2018. p. 45.

COSTA, G. A. **Geotecnologias aplicadas ao estudo comportamental das ilhas de calor urbanas**. 2020. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Jerônimo Monteiro - ES, 2020.

DE LA ROSA, J. M. et al. Mulching-induced preservation of soil organic matter quality in a burnt eucalypt plantation in central Portugal. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 1135–1144, 1 fev. 2019.

DE OLIVEIRA, V. F. R. et al. Geoprocessamento aplicado ao mapeamento de risco a incêndios. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1194, 1 jun. 2020.

DE SANTANA, R. O.; DELGADO, R. C.; SCHIAVETTI, A. Modeling susceptibility to forest fires in the Central Corridor of the Atlantic Forest using the frequency ratio method. **Journal of Environmental Management**, v. 296, n. December 2020, 2021.

DE SOUSA, A. C.; SEVILLA-PAVÓN, A.; SEIZ-ORTIZ, R. Autonomy and ICT in Environmental Education. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 46, p. 1343–1347, 2012.

DENNIS, F. C. **Fuelbreak Guidelines for Forested Subdivisions & Communities**. 1. ed. Fort Collins, Colorado: Colorado State Forest Service, 2005.

DICIO. **Predição - Dicio, Dicionário Online de Português**. Disponível em: <<https://www.dicio.com.br/predicao/>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

SANTOS, A. R. et al. *Fuzzy* logic applied to prospecting for areas for installation of wood panel industries. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 345–359, 2017.

ESKANDARI, S.; MIESEL, J. R. Comparison of the *Fuzzy* AHP method, the spatial correlation method, and the Dong model to predict the fire high-risk areas in Hyrcanian forests of Iran. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 933–949, 2017.

ESRI. **ArcGIS Network Analyst | Vehicle Routing Problem & Spatial Network Analysis**. Disponível em: <<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-network-analyst/overview>>. Acesso em: 5 mar. 2021.

ESRI. **How *Fuzzy* Overlay works**. Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-Fuzzy-overlay-works.htm>>. Acesso em: 16 mar. 2021.

EUGENIO, F. C. et al. Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 173, p. 65–71, 2016a.

EUGENIO, F. C. et al. GIS applied to location of fires detection towers in domain area of tropical forest. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 542–549, 2016b.

FAGUNDES, V. J. **Incêndios florestais em Unidades de Conservação de proteção integral da região metropolitana de Belo Horizonte, MG**. 2016. 123f. Dissertação

(Mestrado em Restauração de Ecossistemas Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2016.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.

FERREIRA, H. R. et al. Incêndios Em Vegetação Em Conjunto Com Outros Materiais Combustíveis Na Interface Urbano-Rural De Curitiba-Pr. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 1, p. 108, 2019.

FIEDLER, N. C. et al. Causas dos incêndios florestais. In: FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, 2020c. p. 55–64.

FIEDLER, N. C. et al. Firefighting combat with fire retardants at different concentrations. **Floresta**, v. 50, n. 1, p. 1107–1112, 2020a.

FIEDLER, N. C. et al. Métodos de detecção e técnicas de combate aos incêndios florestais. In: NILTON CESAR, F.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, 2020b. v. 1p. 153–194.

FIEDLER, N. C. et al. Técnicas de prevenção de incêndios florestais. In: NILTON CESAR, F.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, 2020d. v. 1p. 85–98.

FOMBUENA, A. Unmanned Aerial Vehicles and Spatial Thinking: Boarding Education With Geotechnology And Drones. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 5, n. 3, p. 8–18, 2017.

GAGLIONE, S. et al. *Fuzzy* logic applied to GNSS. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 136, p. 314–322, 2019.

GOBBO, S. D. ANGEL. A. et al. Uso da terra no entorno do PARNA-Caparaó: Preocupação com Incêndios florestais. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 350–361, 2016.

GRIEBELER, A. M. et al. Caracterização quali-quantitativa do material combustível e estoque de carbono em vegetação de capoeira, Santa Maria, RS. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 11038–11046, 9 mar. 2020.

GUIMARÃES, P. P. et al. Análise dos impactos ambientais de um incêndio florestal. **AGRARIAN ACADEMY**, v. 1, n. 1, p. 38–60, 2014.

GUIMARÃES, P. P. et al. Ocorrências de incêndios urbanos e florestais em Mossoró/RN. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 6, p. 43–49, 2019.

GUO, F. et al. Comparison of six generalized linear models for occurrence of lightning-induced fires in northern Daxing'an Mountains, China. **Journal of Forestry Research**, v. 27, n. 2, p. 379–388, 2016.

GUO, F. et al. Understanding fire drivers and relative impacts in different Chinese forest ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 605–606, p. 411–425, 15 dez. 2017.

HALOFSKY, J. E.; PETERSON, D. L.; HARVEY, B. J. Changing wildfire, changing forests: the effects of climate change on fire regimes and vegetation in the Pacific Northwest, USA. **Fire Ecology**, v. 16, n. 4, p. 1–26, 2020.

HOLUŠA, J. et al. A simple model indicates that there are sufficient water supply points for fighting forest fires in the Czech Republic. **International Journal of Wildland Fire**, v. 30, n. 6, p. 428–439, 2021.

HUTTENLOCHER, D. P.; RUCKLIDGE, W. J.; KLANDERMAN, G. A. Comparing images using the Hausdorff distance under translation. **Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, v. 1992–June, n. 9, p. 654–656, 1992.

ICMBIO. **Parque Nacional do Caparaó**. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/parnacaparao/4-parque-nacional-do-caparao.html>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

ICMBIO. **Plano de Manejo: Parque Nacional do Caparaó**. 1. ed. Brasília, DF: Agência Comunica, 2015.

IEMA. **SEAMA - IJSN - ORTOFOTOMOSAICO ES - IMGS SATÉLITE KOMPSAT 3/3A - 2019-2020**. Disponível em: <<https://geobases.es.gov.br/imagens-kpst-2019-2020>>. Acesso em: 2 abr. 2022.

IEMA. **Unidades de Conservação UCs**. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/unidades-de-conservacao>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

ILIADIS, L. S. A decision support system applying an integrated *Fuzzy* model for long-term forest fire risk estimation. **Environmental Modelling and Software**, v. 20, n. 5, p. 613–621, 2005.

- JAISWAL, R. K. et al. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 4, p. 1–10, 1 ago. 2002.
- JOHNSTON, L. M. et al. Wildland fire risk research in Canada. **Environmental Reviews**, v. 28, n. 2, p. 164–186, 2020.
- JUVANHOL, R. S. et al. Gis and *Fuzzy* logic applied to modelling forest fire risk. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. suppl 3, p. 1–18, 2021.
- JUVANHOL, R. S.; FIEDLER, N. C.; SANTOS, A. R. DOS. Modelagem de risco de incêndios em florestas naturais com o uso de geotecnologias. In: SANTOS, A. R. DOS et al. (Eds.). **Geotecnologias & análise ambiental: aplicações práticas**. 1. ed. Alegre - ES: CAUFES, 2015. p. 160–172.
- KOPROSKI, L. D. P.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V. Ocorrências De Incêndios Florestais No Parque Nacional De Ilha Grande - Brasil. **Floresta**, v. 34, n. 2, p. 193–197, 2004.
- KOPROSKI, L. et al. Modelo de zoneamento de risco de incêndios para unidades de conservação brasileiras: O caso do parque estadual do cerrado (PR). **Floresta**, v. 41, n. 3, p. 551–562, 2011.
- KOTTEK, M. et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.
- LI, J.; CHEN, G.; CHI, Z. A *Fuzzy* image metric with application to fractal coding. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 11, n. 6, p. 636–643, 2002.
- LIMA, E. A. C. DE F.; DORNFELD, C. B. Riscos ambientais associados à ocupação antrópica no entorno de uma Unidade de Conservação. **X Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 10, n. 3, p. 178–187, 2014.
- LIMA, G. S. et al. Avaliação da eficiência de combate aos incêndios florestais em Unidades de Conservação brasileiras. **Floresta**, v. 48, n. 1, p. 113–122, 2018.
- LOISELLE, D. et al. Projecting impacts of wildfire and climate change on streamflow, sediment, and organic carbon yields in a forested watershed. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125403, 2020.
- MAFFIOLETTI, F. D. et al. Influência da cobertura vegetal na temperatura da superfície em cidade pouco urbanizada. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 17, n. 3, p. 161–168, 2021.

- MAPBIOMAS. **MapBiomass [Fogo]**. Disponível em: <<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>>. Acesso em: 10 jun. 2022.
- MARCHI, E. et al. Analysis of helicopter activities in forest fire-fighting. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 35, n. 2, p. 234–243, 2014.
- MARIANO, S. R. **Análise de diferentes volumes de água no combate aos incêndios florestais**. 2016. 21f. Monografia (Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Jerônimo Monteiro - ES, 2016.
- MASELLI, F. et al. Use of NOAA-AVHRR NDVI images for the estimation of dynamic fire risk in Mediterranean areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 2, p. 187–197, 2003.
- MASSINI, V. S.; DO VALE, C. C. A cobertura natural, o potencial paisagístico e o turismo no Parque Nacional do Caparaó (ES/MG). **Caminhos de Geografia**, v. 19, n. 67, p. 253–267, 2018.
- MEDEIROS, M. B. DE; FIEDLER, N. C. Incêndios florestais no Parque Nacional da Serra da Canastra: desafios para a conservação da biodiversidade. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 157–168, 2004.
- MORAES, M. C. P. DE; MELLO, K. DE; TOPPA, R. H. Análise da paisagem de uma Zona de Amortecimento como subsídio para o planejamento e gestão de Unidades de Conservação. **Revista Árvore**, v. 39, n. 1, p. 1–8, 2015.
- MOREIRA, P. A. G.; MENDES, T. A.; SANTOS, D. F. DOS. Avaliação de locais potenciais para instalação de torres de observação para prevenção de risco de incêndios florestais. **Ciencia Florestal**, v. 30, n. 4, p. 1266–1282, 2020.
- MOTA, P. H. S. et al. Forest fire hazard zoning in Mato Grosso State, Brazil. **Land Use Policy**, v. 88, p. 104206, nov. 2019.
- MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853–858, 2000.
- NADERPOUR, M. et al. Forest fire induced Natech risk assessment: A survey of geospatial technologies. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 191, p. 106558, 2019.

NASCIMENTO, G. C.; SENNA, M. C. A. A Influência de Eventos El Niño e La Niña na Avaliação dos Riscos de Ocorrência de Incêndios no Pará. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 43, n. 4, p. 189–201, 2020.

OLAWOYIN, R. Nanotechnology: The future of fire safety. **Safety Science**, v. 110, n. July 2017, p. 214–221, 2018.

OLIVEIRA, G. Q. DE et al. Desenvolvimento inicial de dois híbridos de eucalipto submetidos à irrigação. **Eng. Agríc.**, v. 34, n. 6, p. 1099–1109, 2013.

OLIVEIRA, V. F. R. et al. Geoprocessamento aplicado ao mapeamento de risco a incêndios. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 1194–1212, 2020.

PACHECO, A. P. et al. Cohesive fire management within an uncertain environment: A review of risk handling and decision support systems. **Forest Ecology and Management**, v. 347, p. 1–17, 2015.

PARAJULI, A. et al. Forest fire risk mapping using GIS and remote sensing in two major landscapes of Nepal. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 11, n. 1, p. 2569–2586, 2020.

PELUZIO, T. M. DE O. et al. Detecção de incêndios florestais por satélites. In: FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, 2020. p. 99–116.

PEREIRA, C. A.; FIEDLER, N. C.; MEDEIROS, M. B. DE. Análise De Ações De Prevenção E Combate Aos Incêndios Florestais Em Unidades De Conservação Do Cerrado. **Floresta**, v. 34, n. 2, p. 95–100, 2004.

POURGHASEMI, H. R. GIS-based forest fire susceptibility mapping in Iran: a comparison between evidential belief function and binary logistic regression models. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 1, p. 80–98, 2016.

PRUDENTE, T. D. **Risco integrado de incêndio florestal em áreas de Cerrado: contribuições metodológicas**. 2016. 130f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2016.

RAMALHO, A. H. C. et al. Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113122, 2021b.

RAMALHO, A. H. C. et al. Geotechnology applied to predict the risk of occurrence of fire in the Atlantic Forest. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 707–720, 2021a.

RAMALHO, A. H. C. **Zoneamento de áreas potenciais para implantação de fomento florestal no estado do Espírito Santo por meio de lógica Fuzzy**. 2020. 63f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo – Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Jerônimo Monteiro - ES, 2020.

RAMALHO, A. H. C.; MENEZES, R. A. S. Comportamento das Espécies vegetais com os incêndios florestais. In: FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, 2020. p. 75–84.

RIBEIRO, L.; SOARES, R. V.; BEPLLER, M. Mapeamento do risco de incêndios florestais no município de Novo Mundo, Mato Grosso, Brasil. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 117–126, 2012.

RODRIGUES, J. G. V.; MOREIRA, S. A.; FREIRE, E. M. X. Entraves à efetivação de Unidades de Conservação: Parque Estadual Mata da Pipa, Tibau do Sul – RN – Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 46, p. 109–132, 2018.

ROGERS, B. M. et al. Focus on changing fire regimes: interactions with climate, ecosystems, and society. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 3, p. 12, 2020.

SAKELLARIOU, S. et al. Spatial planning of fire-agency stations as a function of wildfire likelihood in Thasos, Greece.pdf. **Science of the Total Environment**, v. 729, p. 139004, 2020.

SAMPAIO, O. B. **Análise da eficiência de quatro índices na previsão de incêndios florestais para a região de Agudos - SP**. 1999. 157f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1999.

SANT'ANNA, C. DE M. et al. Origem e utilização do fogo. In: FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo: UFES, 2020. v. 1p. 9–16.

SANT'ANNA, C. DE M.; FIEDLER, N. C.; RAMALHO, A. H. C. Métodos de propagação dos incêndios florestais e fatores influentes. In: FIEDLER, N. C.; SANT'ANNA, C. DE M.; RAMALHO, A. H. C. (Eds.). **Incêndios Florestais**. 1. ed. Jerônimo Monteiro - ES: UFES, 2020. p. 33–46.

- SANTOS, A. R. DOS et al. Geotechnology and landscape ecology applied to the selection of potential forest fragments for seed harvesting. **Journal of Environmental Management**, v. 183, p. 1050–1063, 2016.
- SANTOS, A. R. DOS et al. Introdução. In: SANTOS, A. R. DOS et al. (Eds.). **Geotecnologias aplicadas aos recursos florestais**. 1. ed. Alegre - ES: CAUFES, 2012. p. 249.
- SANTOS, J. F.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Perfil dos incêndios florestais no Brasil em áreas protegidas no período de 1998 a 2002. **Floresta**, v. 36, n. 1, p. 93–100, 24 ago. 2006.
- SANTOS, W. DE S.; SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S. Riscos de incêndios florestais em Unidades de Conservação no bioma Mata Atlântica, Paraíba, Brasil. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 14, n. 4, p. 297–304, 2018.
- SARI, F. Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. **Forest Ecology and Management**, v. 480, p. 118644, 2021.
- SEYZINSKI, D. T. et al. Effective use of a helicopter with a Bambi bucket firefighting system in Bulgaria. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 664, n. 1, p. 0–8, 2019.
- SIMARD, Y. L. C. P.; DENKER, J. Efficient Pattern Recognition Using a New Transformation Distance. **Advances in Neural Information Processing Systems 5**, p. 51–58, 1992.
- SOARES NETO, G. B. et al. Riscos de incêndios florestais no parque nacional de Brasília – Brasil. **Territorium**, v. 1, n. 23, p. 161–170, 2016.
- SOARES, R. V. **Incêndios florestais – controle e uso do fogo**. 1. ed. Curitiba, PR: Fundação de Pesquisa florestal do Paraná, 1985.
- SOARES, R. V. Novas tendências no controle de incêndios florestais. **Floresta**, v. 30, n. 1/2, p. 11–21, 2000.
- SOARES, R. V. Perfil dos Incêndios Florestais no Brasil de 1984 a 1987. **Floresta**, v. 18, n. 1/2, p. 94–121, 1988.
- SU, Z. et al. Geographically weighted negative Binomial regression model predicts wildfire occurrence in the Great Xing'an Mountains better than negative Binomial Model. **Forests**, v. 10, n. 5, 2019.

- SURYABHAGAVAN, K. V.; ALEMU, M.; BALAKRISHNAN, M. Gis-based multi-criteria decision analysis for forest fire susceptibility mapping: A case study in Harena forest, southwestern Ethiopia. **Tropical Ecology**, v. 57, n. 1, p. 33–43, 2016.
- TAGLIARINI, F. DE S. N. et al. Zoneamento do risco de incêndios florestais em bacia hidrográfica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 28779–28790, 2020.
- TETTO, A. F.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V. Zoneamento de risco de incêndios florestais para a Floresta Nacional de Irati, Estado do Paraná Brasil. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 40, n. 94, p. 259–265, 2012.
- TIEN BUI, D. et al. A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-Fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 233, p. 32–44, 15 fev. 2017.
- TORRES, F. T. P. et al. Influência do relevo nos incêndios em vegetação em Juiz de Fora (MG). **GEOgraphia**, v. 18, n. 36, p. 170, 2016b.
- TORRES, F. T. P. et al. Mapeamento do risco de incêndios florestais utilizando técnicas de geoprocessamento. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.
- TORRES, F. T. P. et al. Perfil dos incêndios florestais em unidades de conservação brasileiras no período de 2008 a 2012. **Floresta**, v. 46, n. 4, p. 531–541, 2016a.
- TORRES, F. T. P. et al. Use of Geographic Information Systems in forest fires mapping in Southeastern of Brazil. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 10, n. 16, p. 28–35, 2016c.
- VAN MANTGEM, P. J. et al. Climatic stress increases forest fire severity across the western United States. **Ecology Letters**, v. 16, n. 9, p. 1151–1156, 2013.
- VENKATESH, K.; PREETHI, K.; RAMESH, H. Evaluating the effects of forest fire on water balance using fire susceptibility maps. **Ecological Indicators**, v. 110, p. 105856, 2020.
- VENTURI, N. L.; ANTUNES, A. F. B. Determinação de locais ótimos para implantação de torres de vigilância para detecção de incêndios florestais por meio de Sistema de Informações Geográficas. **Floresta**, v. 37, n. 2, p. 159–173, 21 ago. 2007.
- VERDE, J. C. **Avaliação da perigosidade de incêndio florestal**. 2008. 97f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Universidade de Lisboa, Faculdade de Letras Departamento de Geografia, Lisboa, Portugal, 2008.

- VIGANÓ, H. H. DA G. et al. Prediction and modeling of forest fires in the pantanal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 306–316, 2018.
- WANG, L.; ZHANG, Y.; FENG, J. On the Euclidean distance of images. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 27, n. 8, p. 1334–1339, 2005.
- WHITE, L. A. S.; WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T. Modelagem espacial de risco de incêndio florestal para o município de Inhambupe, Bahia, Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 85, p. 41, 2016.
- XAVIER, A. C. **My Research Software**Alegre, ES, 2021. Disponível em: <<https://github.com/AlexandreCandidoXavier/BR-DWGD>>. Acesso em: 2 abr. 2022
- YOU, W. et al. Geographical information system-based forest fire risk assessment integrating national forest inventory data and analysis of its spatiotemporal variability. **Ecological Indicators**, v. 77, n. June 2017, p. 176–184, 2017.
- ZANOM. **Reservatório para Combate a Incêndio - Projeto e Fabricação**. Disponível em: <<https://zamon.com.br/reservatorio-para-combate-incendio/>>. Acesso em: 9 jun. 2022.
- ZEFERINO, J. A.; ROSA, R. J. Modelo matemático para otimizar a localização de aeronaves para combate a incêndios florestais. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 1516, 2019.