



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



TAMIRES DA SILVA ESTEVAM

**ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A INCÊNDIOS FLORESTAIS NO PARQUE
ESTADUAL DO ITACOLOMI COMO FERRAMENTA AUXILIAR DE PREVENÇÃO E
COMBATE ÀS QUEIMADAS**

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Ouro Preto, 2020

TAMIRES DA SILVA ESTEVAM

**ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A INCÊNDIOS FLORESTAIS NO PARQUE
ESTADUAL DO ITACOLOMI COMO FERRAMENTA AUXILIAR DE PREVENÇÃO E
COMBATE ÀS QUEIMADAS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção ao Grau em Engenharia Ambiental.

Professor orientador: Doutor César Falcão Barella

Ouro Preto, Dezembro de 2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

E79a Estevam, Tamires da Silva .

Análise da susceptibilidade a incêndios florestais no Parque Estadual do Itacolomi como ferramenta auxiliar de prevenção e combate às queimadas. [manuscrito] / Tamires da Silva Estevam. - 2020.

63 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. César Falcão Barella.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

Área de Concentração: Meio Ambiente.

1. Incêndios florestais. 2. Unidade de conservação. 3. Métodos estatísticos. 4. Parque Estadual do Itacolomi (Ouro Preto, MG). I. Barella, César Falcão. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 614.84

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - CRB6 1583

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas – Colegiado do Curso de
Engenharia Ambiental – CEAMB

Folha de Aprovação

TAMIRES DA SILVA ESTEVAM

**ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A INCÊNDIOS FLORESTAIS NO PARQUE
ESTADUAL DO ITACOLOMI COMO FERRAMENTA AUXILIAR DE PREVENÇÃO E
COMBATE ÀS QUEIMADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 07/12/2020 pela
comissão avaliadora constituída pelos professores:



CÉSAR FALCÃO BARELLA – DEAMB/UFOP



Lívia Cristina Pinto Dias – DEAMB/UFOP
(Participação por Videoconferência)



Rômulo Reis Pereira – Brigada 1 (Núcleo Ouro Preto) e SAAE de Mariana
(Participação por Videoconferência)

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para mudar o mundo.”
Nelson Mandela

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus que me deu forças e esperança para nunca desisti dos meus sonhos.

Agradeço a minha irmã Vanessa por ser um exemplo de vida e sempre me apoiar e ajudar.

As minhas amigas, em especial Maria Laura, Camilla, Carla, Déborah e Nathy, pelo companheirismo, amizade e paciência.

Ao meu orientador César Falcão Barella pela ajuda, apoio e incentivo. Obrigada por ser sempre acessível, dedicado e por contribuir de forma excepcional no meu desenvolvimento profissional.

Ao Rômulo Reis Pereira, Lia de Mendonça Porto e ao Anderson de Freitas e Silva por me ajudarem a entender a problemática em estudo e sempre serem prestativos.

Ao Instituto Estadual de Florestas, representado pelo Rodolfo Silvério Vilela, que disponibilizaram o histórico de incêndios ocorridos no Parque Estadual do Itacolomi. Dados essenciais para a presente modelagem ambiental.

E a todos os familiares que de alguma forma estavam presentes me apoiando em minha caminhada.

RESUMO

Os incêndios são umas das maiores ameaças às florestas brasileiras. Quando ocorrem em Unidades de Conservação, as quais objetivam garantir a manutenção dos recursos naturais, promovem o comprometimento da biodiversidade e da manutenção de processos ecológicos locais. Nesse contexto, o presente trabalho objetiva estudar as condicionantes que influenciam no processo de ocorrência dos incêndios no Parque Estadual do Itacolomi, bem como produzir um mapa de susceptibilidade a incêndios florestais e outro de dificuldade de combate. Deste modo, foi produzido um mapa de susceptibilidade conservador baseado na técnica estatística de Valor Informativo (VI), que é considerada menos subjetiva quando comparada à multicriterial. Já o mapa de combate foi produzido a partir da álgebra de mapas em ambiente SIG, devido à inexistência de metodologia consolidada. Tais mapas foram confeccionados por meio dos fatores distância euclidiana das infraestruturas antrópicas, distância euclidiana da rede hidrográfica, a distância euclidiana da rede viária, a altitude, a combustibilidade vegetal, a radiação solar média anual, o fluxo acumulado da rede de drenagem, o tipo de vegetação, a declividade e curvatura das encostas. Como resultado, 42% da área total estudada possui baixa probabilidade à incêndios (susceptibilidade) e 37% média propensão ao evento. Quanto às condições de combate, majoritariamente, a área possui características que a categorizam como de alta (44,5%) e média (51,3%) dificuldade de combate, sendo que apenas cerca de 4,2% da área o combate local é considerado fácil. Ressalta-se ainda que o combate é difícil nas regiões de alta susceptibilidade à incêndios, o que indica que essas requerem atenção especial, principalmente, porque estão sob alta pressão antrópica, ou seja, mais exposta à ação de incendiários.

Palavras-chave: Incêndios Florestais; Unidade de Conservação; Valor Informativo; Curva de Sucesso e Predição; Parque do Itacolomi.

ABSTRACT

Fires are one of the greatest threats for Brazilian forests. When they occur in preservation units, which have the objective to ensure the maintenance of natural resources, they promote commitment to biodiversity and to the maintenance of local ecological processes. In that context, this assignment aims to study the conditions which influence in the occurrence of fires in the Itacolomi State Park, as well as of producing a map of susceptibility to forest fires and another of fire-fighting difficulty. Thus, a conservative-style map of susceptibility was produced based on the statistical technique of Information Value (IV), which is considered less subjective when compared to the multicriteria one. The combat map, in its turn, was produced on the basis of map algebra, in a GIS environment, due to the inexistence of the consolidated methodology. Such maps were confectioned through the factors: Euclidian infrastructure distance, Euclidian hydrographic network distance, Euclidian road network distance, altitude, vegetable combustibility, annual average solar radiation, drainage network accumulated flow, vegetation type, steepness and curvature of the slopes. As a result, 42% of the total studied area has low susceptibility to fires, and 37% of it has medium propensity for the same events. When it comes to fire-fighting conditions, most of the area has characteristics which characterize it as having high (44.5%) and medium (51.3%) difficulty, with only about 4.2% of the area being considered of easy local fire-fighting. Furthermore, it must be highlighted that fire-fighting is difficult in regions with high susceptibility to fires, which indicates that those regions particularly require special attention, as they are under high anthropic pressure, that is, more exposed to the action of arsonists.

Keywords: Forest Fires; Conservation Unit; Informative value; Succession and forecast curve; Itacolomi Park

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência, no período de 2015 até 12/06/2020.	14
Figura 2: Esquema da formação do fogo (triângulo do fogo).	17
Figura 3: Localização do Parque Estadual do Itacolomi e das respectivas áreas queimadas entre 2012 a 2018.	27
Figura 4: Metodologia utilizada na elaboração do Mapa de Susceptibilidade e de Combate para o Parque Estadual do Itacolomi.	28
Figura 5: Altitude da área de estudo.	37
Figura 6: Distância euclidiana das infraestruturas antrópicas presentes na área de estudo.	39
Figura 7: Radiação solar anual na área de estudo.	40
Figura 8: Combustibilidade da vegetação na área de estudo.	41
Figura 9: Área campo rupestre quartzíticos (A) e de campo rupestre (B) no PEIT.	41
Figura 10: Declividade da área de estudo.	42
Figura 11: Distância euclidiana da rede viária da área de estudo.	43
Figura 12: Curvatura das encostas da área de estudo.	44
Figura 13: Fluxo acumulado da rede de drenagem da área de estudo.	45
Figura 14: Modelo de susceptibilidade à ocorrência de incêndios florestais no Parque Estadual do Itacolomi.	48
Figura 15: Mapa de dificuldade de combate à incêndios florestais no PEIT.	50
Figura 16: Mapa de combate e susceptibilidade a incêndios no PEIT.	52

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1: Velocidade de propagação do fogo condicionada à inclinação/declividade do terreno.	18
Tabela 2: Tipos de combustível x diâmetro x respectivos tempos de retardo.....	19
Tabela 3: Dados espaciais primários.	29
Tabela 4: Categorização da combustibilidade para a área de estudo.	33
Tabela 5: Categorização do modelo de susceptibilidade para o Parque do Itacolomi de acordo com a proporção de incêndios esperados.	35
Tabela 6: Categorização do mapa de combate ou supressão do fogo no Parque do Itacolomi de acordo com os valores dos pixels.	36
Tabela 7: Ordenação das classes mais influentes na ocorrência e propagação de incêndios.	36
Tabela 8: Resultado dos modelos de susceptibilidade obtidos por meio da combinação dos fatores influentes.	46
Tabela 9 - Progresso da taxa de sucesso e predição e a distribuição das áreas das classes de susceptibilidade no PEIT.....	47

LISTAS DE SIGLAS E ABREVEATURAS

AAC - Área Abaixo da Curva

CE: Curvatura das Encostas

CV: Combustibilidade da Vegetação

DEIA - Distância Euclidiana das Infraestruturas Antrópicas

DERH - Distância Euclidiana da Rede Hidrográfica

DERV: Distância Euclidiana da Rede Viária

FARD: Fluxo Acumulado da Rede de Drenagem

ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

DCLV – Declividade

IEF - Instituto Estadual de Florestas

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MIN - Ministério da Integração Nacional

NDVI - Índice da Diferença Normalizada

PEIT - Parque Estadual do Itacolomi

RMA: Radiação Média Anual

ROIs – Relatórios de Ocorrências de Incêndios

UC - Unidade de Conservação

VI - Valor Informativo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo geral:	16
2.2. Objetivos específicos:.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. Variáveis envolvidas na ocorrência e propagação de incêndios florestais	16
3.2. Metodologias utilizadas no estudo de incêndios florestais.....	20
3.2.1 Método Estatístico do Valor Informativo	21
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
5. MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1. Banco de dados geoespacial	29
5.2. Elaboração do Modelo de susceptibilidade	33
5.3. Elaboração do Modelo de combate.....	35
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
6.1. Seleção, classificação e análise das variáveis condicionantes.....	36
6.2. Modelo de susceptibilidade	45
6.3. Modelo de combate aos incêndios florestais no PEIT	49
7. CONCLUSÃO	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Incêndio florestal pode ser definido como o fogo que se inicia sobre uma vegetação de forma natural ou antrópica e que se propaga sem controle (VASCONCELOS, 2013). A ocorrência de incêndios florestais no Brasil, principalmente em Unidades de Conservação (UC), que possuem características ambientais de extrema relevância, constitui uma das maiores ameaças à biodiversidade e à manutenção de processos ecológicos (BRASIL, 2000).

Diante da diversidade ecológica resguardada pelas unidades de conservação, a propagação de incêndios nesses locais gera consequências em diversas escalas, dentre elas, destacam-se a degradação da vegetação e da fauna, perda da fertilidade dos solos, comprometimento da qualidade do ar, alteração e fragmentação paisagística, assim como dos serviços ecológicos ou ecossistêmicos (FAGUNDES, 2016; ADÁMEK *et al.*, 2015; VASCONCELOS, 2013; ICMBIO, 2010). Há também prejuízos financeiros, culturais e humanos. No âmbito local e regional, a fumaça produzida gera problemas para a saúde humana e afeta os meios de transporte (TORRES *et al.*, 2016; BARLOW *et al.*, 2012). Ademais, os incêndios promovem o aumento nas emissões de carbono para a atmosfera, o que contribui para o agravamento de problemas climáticos globais.

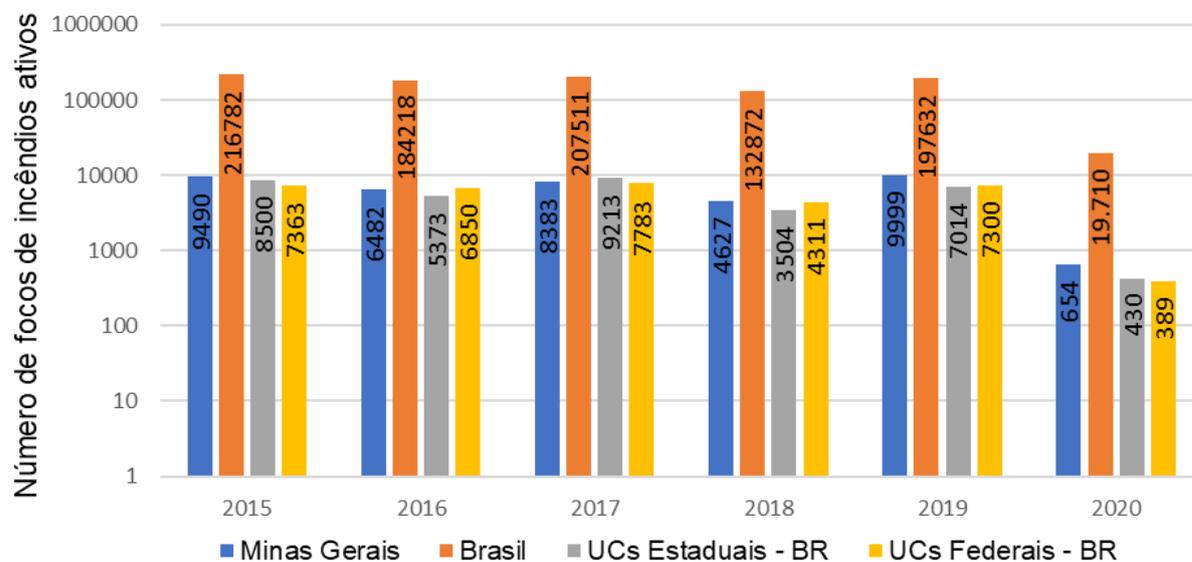
A deflagração de incêndios na vegetação ocorre de forma natural, quando há condições climáticas e material vegetal combustível favorável ao seu início. Entretanto, grande parte dos incêndios possuem ligações diretas com a ação humana (acidental ou intencional). A deflagração de incêndios florestais oriundos por ações antrópicas (renovação de pastagens, limpeza de áreas e piromania) é a principal causa dos incêndios estudados por Vasconcelos (2013), Tomzhinski (2012), Ferreira (2010), Oliveira (2006), Medeiros e Fiedler (2003), dentre outros. Medeiros e Fiedler (2003) desenvolveram um estudo no Parque Nacional da Serra da Canastra e concluíram que 50% das causas de incêndios florestais derivam de ações antrópicas, sendo que a maior parte (47%) é criminosa. No Parque Estadual do Itacolomi não é diferente, já que mais de 90% dos incêndios que ocorreram entre 2012 e 2018 são oriundos de ações antrópicas, conforme identificado nas análises dos Relatórios de Ocorrência de Incêndios realizadas nesta pesquisa.

Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED UFSC, 2013) 38.996 ocorrências de incêndios florestais foram registradas no país entre 1881 e 2012. Entre 2014 e 2018, foram registrados 913.039 focos ativos de queimadas no Brasil, sendo que 4,36% desses

focos ocorreram no Estado de Minas Gerais e 19,67% ocorreram no Estado do Pará, região com o maior número de ocorrências (INPE, 2019).

Na Figura 1 está apresentada a série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência NPP-SUOMI (Sensor VIIRS) da NASA+NOAA_DoD dos EUA, NOAA-AVHRR, NPP, MODIS (AQUA e TERRA), do Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE), no período de 2015 até 12/06/2020. É possível perceber o quão atingidas são as Unidades de Conservação. A quantidade de focos detectadas nestas áreas, quando somadas as unidades de esfera federal e estadual, correspondem a quase o dobro dos focos detectados em todo o Estado de Minas Gerais. Porém, ressalta-se que a detecção desses focos não distingue queimadas de incêndios.

Figura 1: Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência, no período de 2015 até 12/06/2020.



Nota: Os valores do ano de 2020 são parciais, porque compreendem as detecções entre 01/01 e 12/06, porém os demais valores compreendem o ano todo.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do INPE/MMA – Programa de Queimadas.

Para a adoção e o aperfeiçoamento de medidas e estratégias de prevenção e combate aos incêndios, bem como para a melhoria da gestão das Unidades de Conservação, é importante a elaboração de mapas de susceptibilidade à ocorrência e à propagação de incêndios florestais. Entende-se por susceptibilidade a probabilidade espacial de ocorrência de um fenômeno associado à existência de fatores (características permanentes e naturais do terreno) condicionantes ao evento (BUI *et al.*, 2016; VASCONCELOS, 2013; DIMUCCIO *et al.*, 2011; BERGONSE e BIDARRA, 2010; OLIVEIRA, 2006). No caso de incêndios florestais percebe-se que os parâmetros influenciadores envolvem características geomorfológicas,

climatológicas, antrópicas e biológicas. Quando se estuda a susceptibilidade à incêndios de uma área ou unidade de conservação, além destes fatores também é importante as observações da área, a interpretação e o conhecimento prévio dos pesquisadores sobre o local de estudo.

Para conhecer as áreas susceptíveis à incêndios florestais diversas técnicas vêm sendo aplicadas para a produção de mapas. Dentre elas destaca-se a técnica multicritério que integra os fatores e informações relacionadas ao evento estudado. Apesar de amplamente aplicado, esse método incorpora um alto grau de subjetividade, devido a dependência de conhecimento técnico para realizar a análise. Para diminuir essa subjetividade pode-se empregar técnicas estatísticas, que são métodos quantitativos, indiretos e passíveis de validação para atestar a sua consistência.

Dessa forma, o presente trabalho adotou uma técnica estatística para avaliar a susceptibilidade a incêndios florestais do Parque Estadual do Itacolomi, em particular o método bivariado do Valor Informativo (VI). Assim, considerando o contexto sociocultural regional, a proximidade dos aglomerados urbanos das cidades de Ouro Preto e Mariana em relação ao parque e a importância histórica e biológica do Parque do Itacolomi, este projeto tem como proposta estudar as variáveis que influenciam a ocorrência e a propagação de incêndios na área, elaborar um modelo (mapa) de susceptibilidade e outro de combate à incêndios. Tais modelos contemplaram informações, que possibilitam a identificação das áreas com maior ou menor probabilidade de ser atingida pelo fogo e o seu respectivo grau de dificuldade de combate.

Ambos os mapas estão categorizados nas classes alto, médio e baixo, sendo que cada uma será representada por uma cor, para facilitar e deixar a sua interpretação mais objetiva. Logo, espera-se que tais produtos auxiliem os órgãos responsáveis e o comando de operações da brigada na tomada de decisões, na adoção de medidas de prevenção, na elaboração das estratégias e táticas de combate ao fogo e no direcionamento de atividades de educação ambiental com as comunidades envolvidas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral:

Desenvolver um mapa de suscetibilidade e de combate a incêndios florestais para o Parque Estadual do Itacolomi, que permita identificar os locais mais propensos à ocorrência e à propagação desse evento e a dificuldade de combate, visando orientar a elaboração e o aperfeiçoamento de planos de prevenção, monitoramento e de combate a incêndios florestais.

2.2. Objetivos específicos:

- Analisar os fatores condicionantes que influenciam diretamente à deflagração e à propagação de incêndios florestais;
- Alertar sobre a importância das cartas de susceptibilidade a incêndios florestais para a gestão das Unidades de Conservação em épocas de estiagem;
- Produzir o mapa de susceptibilidade e outro de dificuldade de combate a incêndios florestais do Parque Estadual do Itacolomi;
- Criar um instrumento que possa orientar os planos de prevenção, monitoramento e combate a incêndios florestais na área do Parque Estadual do Itacolomi.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Variáveis envolvidas na ocorrência e propagação de incêndios florestais

O fogo é resultado de uma reação química de oxidação originada a partir da combinação entre oxigênio (comburente), combustíveis (vegetação viva ou morta) e uma fonte de calor (BRIGADA 1, 2014; ICMBIO, 2010), conforme representado na Figura 2. Partindo dessa premissa, o estudo da formação do fogo (triângulo do fogo) é de suma importância nos estudos de incêndios florestais e na formulação de planos de prevenção e combate, pois a retirada de um dos elementos cessa o processo.

Figura 2: Esquema da formação do fogo (triângulo do fogo).



Fonte: Adaptado de ICMBIO, 2010.

O fogo é considerado um grande modificador da paisagem e possui diversas aplicabilidades. Seu uso comum consiste na limpeza de pastos, na preparação de terreno e na renovação de pastagens. Nesta perspectiva, os pesquisadores Kazmierczak (2015) e Tomzhinski (2012) enfatizam que há diferença entre os termos incêndio florestal e queimada (controlada). O primeiro é considerado um desastre natural climatológico pela Classificação Brasileira de Desastres (COBRADE, 2012) e pela Instrução Normativa nº 1, de 24 de agosto de 2012 (MIN, 2012), e consiste na propagação do fogo sobre uma vegetação de forma descontrolada. Em contrapartida, o segundo é a aplicação de fogo de forma controlada, como na renovação de pastos e na limpeza de terrenos para cultivo. Entretanto, deve-se ressaltar que os incêndios deixam de ser um desastre natural quando resultam da ação antrópica.

Devido ao grande impacto causado pelos incêndios florestais, vários estudos vêm sendo desenvolvidos para identificar, compreender e retratar as variáveis influentes na deflagração e propagação desse evento. Na literatura técnica e científica, comumente são empregados os seguintes parâmetros: uso e ocupação do solo, radiação solar, formas do relevo, declividade, altitude, densidade populacional, proximidade à rede viária (caminhos florestais e estradas), proximidade da rede hidrográfica, dados climáticos (umidade do ar, a temperatura do ar, o regime de ventos e a pluviosidade) e vegetação (umidade, porte, quantidade, volume, continuidade, compacidade, distribuição e tipo) (TORRES *et al.*, 2017; BRIGADA 1, 2014; SOUSA, 2013; VASCONCELOS, 2013; FERREIRA, 2010; ICMBIO, 2010; OLIVEIRA, 2006; MEDEIROS e FIEDLER, 2003).

Dentre os parâmetros apontados pelas pesquisas mencionadas, a ação humana, seja ela de incendiários e vândalos, é o principal agente causador de incêndios florestais em Unidades de Conservação. Dessa forma, as condicionantes proximidade à rede viária e a densidade populacional são variáveis de grande influência, pois são meios de trânsito de pessoas, que por descuido ou intencionalmente provocam incêndios (VASCONCELOS, 2013; FERRAZ e

VETTORAZZI, 1998). Por outro lado, a rede hidrográfica e a rede viária (estradas, caminhos e trilhas) também podem ser consideradas descontinuidades horizontais do terreno, que funcionam como barreiras que dificultam a dispersão do fogo (BRIGADA 1, 2014; CHUVIECO e CONGALTON, 1989).

Com relação aos fatores climáticos, a temperatura e a umidade relativa do ar estão intimamente relacionadas com a deflagração e a propagação do fogo, uma vez que agem no grau de inflamabilidade e combustibilidade dos vegetais, ou seja, ambos influenciam na presença de umidade da vegetação e do ambiente de forma geral (KAZMIERCZAK, 2015; ICMBIO, 2010). Segundo Vasconcelos (2013), o vento é uma das variáveis mais importantes no estudo da propagação, pois é o responsável pela renovação do oxigênio da combustão e pela disseminação de partículas incandescentes (fagulhas), além de conduzir o ar quente para áreas adjacentes, facilitando a perda de umidade dos combustíveis. Já a precipitação (chuva, orvalho, névoa ou neblina) afeta a umidade da vegetação, do solo e do ar. É importante frisar que os parâmetros climáticos são considerados muito importantes por diversos autores, entretanto, a existência de banco de dados é escassa em muitos países, o que implica numa grande variedade de simulações baseadas em fatores condicionantes de mais fácil aquisição.

Os elementos topográficos impactam diretamente no comportamento do fogo. A declividade, fator mais influente na velocidade de propagação, tem efeito direto sobre a ascensão do ar quente que acelera o aquecimento dos combustíveis, (ICMBIO, 2010). Assim, de acordo com a Brigada 1 (2014), quando o fogo inicia na base do morro, sua velocidade de propagação tende a aumentar com o aumento da inclinação (declividade), em contrapartida, quando esse inicia-se no topo, a velocidade de descida é reduzida. Além disso, a inclinação é um fator que dificulta o acesso às áreas sob incêndios, limitando as ações de combate ou supressão das chamas. Como observa-se na Tabela 1, quanto mais íngreme é a superfície, mais rápida é a propagação das chamas morro acima (ICMBIO, 2010).

Tabela 1: Velocidade de propagação do fogo condicionada à inclinação/declividade do terreno.

Inclinação/declividade (°)	Inclinação/declividade (%)	Velocidade de propagação
0 a 3	0 a 5	1 vez
4 a 10	6 a 19	1,5 vezes
11 a 21	20 a 39	2,0 vezes
22 a 34	40 a 70	4,5 vezes

Fonte: BRIGADA 1 (2014); ICMBIO (2010).

A altitude influencia os fatores atmosféricos, ao passo que quando a altitude aumenta, a quantidade de oxigênio tende a diminuir e a umidade relativa do ar aumentar. A curvatura topográfica influi na presença de umidade no terreno e no regime de ventos, bem como nas características da vegetação presente. Já a radiação solar corresponde à energia radiante emitida pelo Sol e está associada ao maior ou ao menor grau de insolação e exposição da vegetação e da superfície ao processo de perda de umidade.

A vegetação viva e morta é o combustível dos incêndios florestais e o seu tamanho (leve ou pesado), volume (quantidade de material em uma determinada área), continuidade (disposição vertical e horizontal da vegetação), arranjo/composição da flora e compactidade (nível de compactação) são características que interferem diretamente na velocidade de propagação do fogo e na altura das chamas (ICMBIO, 2010). Os combustíveis mais leves (de menor diâmetro) tendem a perder umidade de forma mais fácil, absorvendo o calor produzido pelo fogo de maneira mais rápida (Tabela 2). Em outras palavras, quanto mais fino for o material, menor é o ponto de queima completa e menor é tempo de retardo (tempo que o combustível leva para perder umidade e entrar em combustão) (ICMBIO, 2010). Deve-se ressaltar que o tempo de retardo é influenciado diretamente pela intensidade do calor e/ou das chamas.

Tabela 2: Tipos de combustível x diâmetro x respectivos tempos de retardo.

Combustível	Diâmetro (mm)	Tempo de retardo (hora)
Leve (ervas, folhas, pastagens)	< 5	1
Regular (galhos e caules)	5 a 25	10
Mediano (galhos e caules)	25 a 75	100 (5 dias)
Pesado (galhos e troncos)	> 75	1000 (42 dias)

Fonte: ICMBIO, 2010.

Dessa forma, a cobertura vegetal pode ser obtida pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ou NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e por meio deste pode-se obter a combustibilidade vegetal, que é definida como a capacidade (facilidade) que a vegetação possui em pegar fogo, sendo amplamente utilizada em estudos de susceptibilidade a incêndios florestais (SOUSA, 2013; TOMZHINSKI, 2012; FERNANDES *et al.*, 2011).

3.2. Metodologias utilizadas no estudo de incêndios florestais

O mapeamento de incêndios florestais iniciou-se na década de 1960 e desde então as técnicas de análise estão sendo aperfeiçoadas (CHUVIECO e CONGALTON, 1989). Popular em diversos países, os índices de risco estimam ocorrência de incêndios florestais a partir de dados estritamente meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, ponto de orvalho, etc.), podendo ainda considerar variáveis como o estado da vegetação, a topografia e fatores antrópicos. Dentre as abordagens existentes, o Índice Nesterov, aplicado com sucesso na Rússia (SAMPAIO, 1999), e Índice Monte Alegre, desenvolvido no Brasil na década de 70 (SAMPAIO, 1972), são altamente difundidos.

A análise multicritério é outra técnica amplamente utilizada, sendo considerada uma das metodologias mais aplicadas na elaboração de modelos preditivos com esse enfoque. A análise multicritério é uma técnica de tomada de decisões baseada na integração dos fatores e informações relacionados ao objeto de estudo (HONG *et al.*, 2019; DIMUCCIO, 2011; SILVEIRA *et al.*, 2008). Sua aplicabilidade é ampla, sendo empregada nos mais variados estudos ambientais (AQUINO, 2018; BOHNENBERGER *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2017).

Todavia, apesar de utilizada na previsão de incêndios florestais (HONG *et al.*, 2019; VASCONCELOS, 2013; SILVEIRA *et al.*, 2008; OLIVEIRA, 2006; CHUVIECO e CONGALTON, 1989), essa metodologia pode ser considerada indireta, pois envolve álgebra de mapas, e qualitativa, já que a álgebra de mapas deriva da valoração subjetiva dos fatores condicionantes. Logo, essa metodologia apresenta um certo grau de subjetividade, que varia de acordo com o conhecimento técnico dos especialistas envolvidos na análise (BARELLA, 2016; POURTAGHI, 2015). Chuvieco e Congalton (1989) propuseram um método embasado nessa metodologia e obtiveram sucesso no mapeamento de incêndios florestais (FERRAZ e VETTORAZZI, 1998). Essa abordagem foi reconhecida e utilizada pelo Instituto Geográfico de Portugal, que propôs um método oficial de mapeamento da susceptibilidade a incêndios florestais para o seu território. No Brasil, um método semelhante ao proposto por Chuvieco e Congalton (1989) foi desenvolvido por Ferraz e Vettorazzi (1998). Ademais, Silveira *et al.* (2008) que também fizeram uso da análise multicritério na Bacia do Rio Corumbataí (SP) e obtiveram também bons resultados.

Com o intuito de minimizar a subjetividade imposta pela abordagem multicritério, técnicas estatísticas podem ser empregadas (BERGONSE e BIDARRA, 2010; REIS *et al.*, 2003). As técnicas estatísticas são métodos quantitativos, indiretos e passíveis de validação

(PIEIDADE, 2009; GUZZETTI *et al.*, 1889). Essas metodologias produzem resultados de confiabilidade atestada, reduzindo a subjetividade do produto e contribuindo para decisões mais assertivas. Apesar de não ter um uso comum na produção de modelos de susceptibilidade a incêndios florestais, são amplamente utilizadas na previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos.

3.2.1 Método Estatístico do Valor Informativo

Proposto por Yan (1988) e Yin e Yan (1988), o método bivariado do Valor Informativo (VI) é uma técnica estatística amplamente aplicada e consolidada na literatura em estudos de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos (BARELLA, 2016; LAJAS, 2016; ZÊZERE, 2002). Este índice, que apresenta uma base Bayesiana (PIEIDADE *et al.*, 2011), promove a normalização logarítmica da razão entre a probabilidade de ocorrência de um evento dentro de cada classe, de cada fator condicionante, e a probabilidade de acontecer um incêndio na área de estudo (BARELLA, 2016; LAJAS, 2016). Segundo Barella (2016) e Lajas (2016), o VI é dado pela Equação 1:

$$VI_{IJ} = \ln \left[\frac{\frac{I_{ij}}{N_{ij}}}{\frac{I}{N}} \right] \quad (1)$$

Onde: I_{ij} é a área de ocorrência do evento em N_{ij} ($i, j = 0, 1, 2, \dots, n$), N_{ij} é a zona ocupada pela classe i de alguma variável investigada, I é a superfície limitada por todos os eventos ao longo da área de estudo e N é a área de estudo (total).

A partir da determinação desse *score* (pontuação) ou Valor Informativo, procede-se a verificação do grau de influência de cada classe da variável na ocorrência do fenômeno em estudo. Essa avaliação é baseada nas seguintes proposições:

- $VI = 0 \rightarrow$ Influência inconclusiva da classe do parâmetro investigado;
- $0 < VI < +\infty \rightarrow$ A classe do parâmetro investigado influencia o evento;
- $-\infty < VI < 0 \rightarrow$ A classe do parâmetro investigado não influencia o evento.

Com base no grau de influência, conforme disposto por Yin e Yan (1998), quanto maior o *score* maior a predisposição para a ocorrência do evento nessa classe. Essa interpretação

também é utilizada na avaliação do Valor Informativo final, resultante da combinação aritmética de cada classe, de cada um dos fatores condicionantes do evento na área estudada (Equação 2), indicando a propensão da área investigada à ocorrência de incêndios:

$$VI_f = \sum_{i,j=1}^n VI_{ij} \quad (2)$$

A aplicação do método requer um inventário do evento em estudo, que normalmente é particionado conforme convenção do pesquisador, em que uma parcela do inventário é destinada à formulação do modelo e a outra é usada na sua validação. O VI é calculado para cada classe da variável para determinação da propensão de ocorrência do evento em cada classe. Por meio da soma algébrica dos VI de cada classe obtém-se a propensão ao evento da variável. Os *scores* são analisados conforme disposto neste tópico e também utiliza-se técnicas de análise de sensibilidade para hierarquizar as classes das variáveis e as próprias variáveis, segundo o grau de influência na ocorrência do evento.

Segundo Zêzerê (2006), a estatística bivariada permite um melhor controle da importância das variáveis analisadas, vantagem que lhe é conferida sobre os modelos estatísticos utilizados em avaliações de susceptibilidade. Também há a possibilidade de se analisar cada variável separadamente. Já as desvantagens do método é não considerar a autocorrelação das condicionantes envolvidas na ocorrência do evento estudado e ser condicionada à decisão espacial dos dados utilizados. Por se tratar de um método quantitativo, passível de validação, esta metodologia produz resultados de confiabilidade atestada, reduzindo a subjetividade do produto e contribuindo para decisões mais assertivas.

Os modelos estatísticos de avaliação da susceptibilidade são gerados a partir da combinação dos parâmetros de predisposição de um evento. Ao confeccionar esses tipos de modelos, deve-se compreender que a melhora da sua qualidade nem sempre é condicionada ao acréscimo de variáveis (ZÊZERE *et al.*, 2005). Dessa maneira, visando identificar e hierarquizar esses fatores, para que as combinações não sejam um procedimento moroso e o produto tenha o melhor desempenho, a análise de sensibilidade é utilizada. A Área Abaixo da Curva – AAC, é uma técnica de validação do modelo de susceptibilidade que pode ser adaptada para analisar o desempenho da distribuição das classes dos fatores de predisposição, bem como identificar quais variáveis são mais importantes, com base nos eventos ocorridos. Para isso, diferente da análise de validação, onde todos os parâmetros utilizados na construção do modelo

de susceptibilidade são avaliados de forma integrada, cada variável preditora do fenômeno é testada individualmente.

A validação dos modelos de susceptibilidade consiste na determinação da capacidade preditiva referente a ocorrência de eventos futuros. Para Zêzere (2006), essa etapa é decisiva e indispensável neste tipo de modelo. A cartografia de susceptibilidade pode ser validada por meio da aplicação de diversas metodologias, dentre elas cita-se as Curvas de Sucesso e Predição, quantificadas pela Área Abaixo da Curva - AAC. Seus valores variam entre 0 e 1, onde 1 corresponde ao modelo perfeito. A AAC pode ser utilizada para comparar quantitativamente as curvas de sucesso e predição de modelos de susceptibilidade produzidos (LAJAS, 2016), sendo representada pela Equação 3.

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[(H_i - H_{i+1}) \times \frac{(b_i + B_{i+1})}{2} \right] \quad (3)$$

Onde $(H_i - H_{i+1})$ corresponde à altura do trapézio, mensurada no eixo das abscissas, e b_i e B_{i+1} correspondem às bases do trapézio, mensurada no eixo das ordenadas.

Propostas por Chung e Fabbri (1999), essas curvas consistem na elaboração de gráficos onde a abscissa é composta pelas porcentagens acumuladas em ordem decrescente de susceptibilidade da área de estudo e a ordenada pelas porcentagens acumuladas das áreas preditivas dentro da área de estudo (ordem decrescente). A diferença entre a Curva de Sucesso e de Predição reside na parcela do inventário de eventos utilizado. A Curva de Sucesso faz uso dos dados utilizados na construção do modelo, ou seja, avalia o grau de ajuste do modelo aos dados que lhe deram origem (BARELLA, 2016). Já a Curva de Predição utiliza os dados que não foram empregados na confecção do modelo, testando assim a capacidade do modelo em prever acontecimentos futuros (ZÊZERE, 2006). Essa metodologia foi utilizada por Ferreira (2010) para testar a representatividade do modelo nacional português de susceptibilidade a incêndios florestais proposto pelo Instituto Geográfico Português, bem como para validar os modelos produzidos por outros autores, com destaque para as pesquisas de Chuvieco e Congalton (1989), Ferraz e Vettorazzi (1998) e do Virginia Department of Forestry (Nacional Wildland/Urban Fire Protection Program, [s.d.]).

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Avaliação da susceptibilidade a incêndios florestais foi realizada na área do Parque Estadual do Itacolomi (PEIT), localizado na região sudeste do Estado de Minas Gerais, entre os municípios de Mariana e Ouro Preto (IEF, 2007a). Com uma área de aproximadamente 60 km², o parque foi criado em 14 de junho de 1967, pela Lei nº 4.495 (MINAS GERAIS, 1967) e em 2004 foi aberto à visitação pública. O PEIT possui uma infraestrutura básica com alojamentos, portaria, auditório, entre outros espaços. Além de representar um patrimônio natural, o parque abriga o Pico do Itacolomi, que possui cerca de 1.772 m de altitude e é considerado um marco histórico de localização que serviu como referência para os bandeirantes no século XVIII. O Pico era chamado de “Farol dos Bandeirantes” (IEF, 2007a), e o nome *Itacolomy*, atribuído a ele, vem da língua tupi e significa “pedra menino”, visto que os índios viam o pico como o “filhote” da montanha ou “pedra mãe” (IEF, 2007a). A entrada principal do parque encontra-se no município de Ouro Preto, no entroncamento com a BR-356, próximo ao Hospital Santa Casa de Misericórdia, localizada no Bairro Vila Itacolomy. Entretanto, há também outras vias de acesso não oficiais.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o Parque Estadual do Itacolomi está localizado em uma região de clima temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa) a moderadamente quente (Cwb). Os meses de maio a setembro apresentam uma menor precipitação mensal, com valores inferiores a 70 mm (IEF, 2007a). No inverno, a incidência solar é menor e as temperaturas médias variam entre 15,5°C e 16,1°C (ANDRADE, 2008).

O potencial hídrico do parque é grande devido ao número de nascentes existentes, cuja maioria deságua em afluentes do Rio Gualaxo do Sul e do Rio Doce. Os cursos d’água mais importantes são os córregos do Manso, dos Prazeres, Domingas, do Benedito e o ribeirão Belchior (Figura 3).

Quanto a importância biológica o PEIT está na Zona Núcleo da Reserva Biosfera da Serra do Espinhaço - RBSE - (porção sul) e da Mata Atlântica (RBMA). Reserva da Biosfera é um modelo, adotado internacionalmente, de gestão integrada participativa e sustentável dos recursos naturais (MMA, 2016). A RBSE abriga a maior parte dos campos rupestres, nascentes das principais bacias hidrográficas brasileiras e possuem alto grau de endemismo de sua flora e fauna (DRUMMOND *et al.*, 2005).

Nesse contexto, de acordo com inventário florestal realizado em 2009 pelo Instituto Estadual de Floresta (IEF) e SOS Mata Atlântica e conforme as informações disponibilizadas

pelo IEF (2007a) e MMA (2020), no território do parque há Floresta Estacional Semidecidual Montana e campos de altitude como fisionomia do Bioma Mata Atlântica. A Floresta Estacional Semidecidual se caracteriza pela presença de árvores de tamanhos variados, apresentando-se mais densa no fundo dos vales (junto a drenagens) e nas matas de galerias. No geral as florestas da área estão no estágio de sucessão secundária, com a presença de muitas espécies pioneiras e intermediárias (MMA, 2020). Os campos de altitude são característicos de altitude superior a 1500 m, constituídos de arbustos e espécies campestres, cuja ocorrência está associada a rochas ígneas e metamórficas (VASCONCELOS, 2011).

Dentre as fisionomias do Bioma Cerrado há zonas com campos, campos rupestres, campos rupestres quartzíticos (compostos principalmente de gramíneas e encontram-se nos quartzitos, em superfícies aplainadas ou de menor altitude) e de candeias, que são árvores de porte médio, pioneira e rústica, de ocorrência predominante em altitudes na faixa de 650 a 1.700 m. Os campos rupestres representam aproximadamente 60% da área e possuem alto grau de endemismo, devido a peculiaridade das condições ecológicas do parque (MMA, 2020).

Segundo o Atlas de Biodiversidade de Minas Gerais (DRUMMOND *et al.*, 2005), o PEIT é categorizado como área de alta importância biológica para conservação da flora e de diversas categorias da fauna. Nesse sentido, é importante ressaltar que no PEIT encontram-se espécies ameaçadas como a Braúna (*Melanoxylon brauna*), a Arnica-da-Serra (*Lychnophora brunioides*), e também espécies endêmicas como *Habenaria Itacolumia*, *Cybianthus Itacolomyensis*, *Microlicia Glazioviana*, *Chamaecrista dentata*, *C. hedysaroides*, *C. Mucronata*, *C. rotundata*, *Senna reniformis*, *Mimosa aurivillus var. aurivillus*, *anemia imbricata* e *A.ouropretana* (MMA, 2020; IFE, 2007a). Quanto a fauna, cabe destacar a ocorrência da espécie de anfíbio *Physalemus erythros*, também considerada endêmica da área (MMA, 2020; IEF, 2007a).

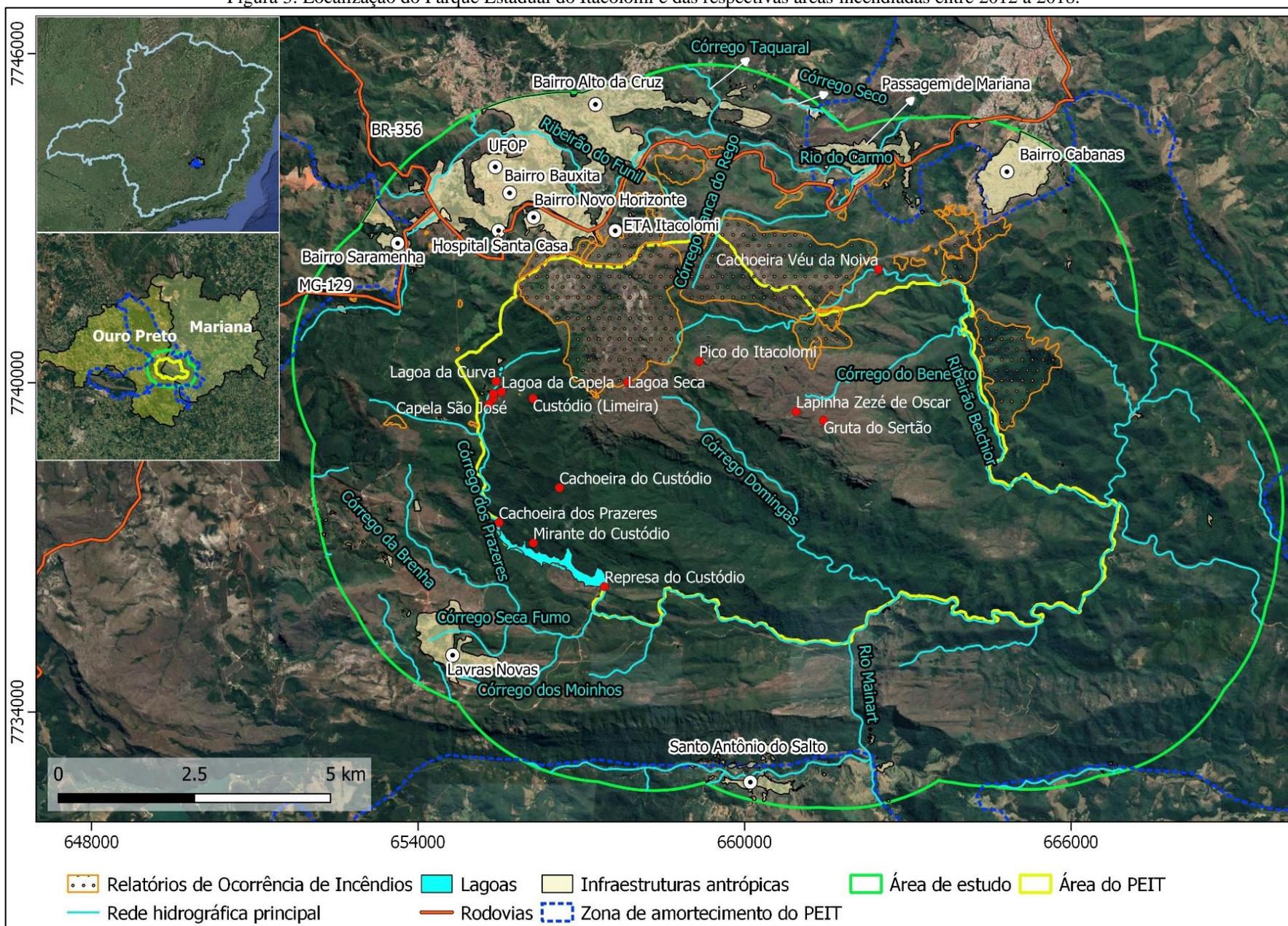
Todas as características supracitadas são condicionadas a um relevo majoritariamente montanhoso, com áreas escarpadas, com altitudes variando de 400 a 1640 m. Há também uma região de chapada/platô, um relevo típico de planalto sedimentar que se caracteriza por topos planos ou suavemente ondulados, com amplitudes que variam de 0 a 20 m, delimitada por escarpas e vertentes íngremes (IBGE, 2019; MACHADO e SILVA, 2010). Essa área é formada pelo Grupo Itacolomi, onde as altitudes variam de 1240 a 1680 m.

A área de estudo adotada na elaboração do mapa de susceptibilidade envolveu uma parcela da zona de amortecimento e as 46 áreas incendiadas dos anos de 2012, 2013, 2014,

2016, 2017 e 2018. Os incêndios atingiram uma área de 14,92 km², considerando que algumas áreas foram incendiadas mais de uma vez. A maioria dos incêndios foram iniciados em áreas externas e próximas ao parque, às margens da BR 356, que liga a cidade à capital Belo Horizonte, e em locais de ocupação humana. Como essas áreas ultrapassam o limite legal do parque, a área total de análise foi dimensionada considerando um raio de 30 m a partir desse limite, totalizando em uma área de 190,7 km² (Figura 3).

Já as características relacionadas ao uso e ocupação da área de estudo, observa-se que a área engloba diversos bairros de Ouro Preto (Bauxita, Saramenha, Novo Horizonte, Pocinho) e Mariana (Cabanas, Passagem de Mariana, Cartucha), Lavras Novas e Santo Antônio do Salto. O Diagnóstico de Parque (IEF, 2007a) cita diversas pressões oriundas do entorno do parque, dentre elas cabe destacar a falta de regularização da área do parque (regularização fundiária), a pressão urbana e o saneamento básico precário, o desmatamento e os incêndios causados pelas atividades de obtenção de lenha, em especial nas regiões de Cabanas e Serrinha, a presença de diversas atividades econômicas impactantes como a mineração.

Figura 3: Localização do Parque Estadual do Itacolomi e das respectivas áreas incendiadas entre 2012 a 2018.



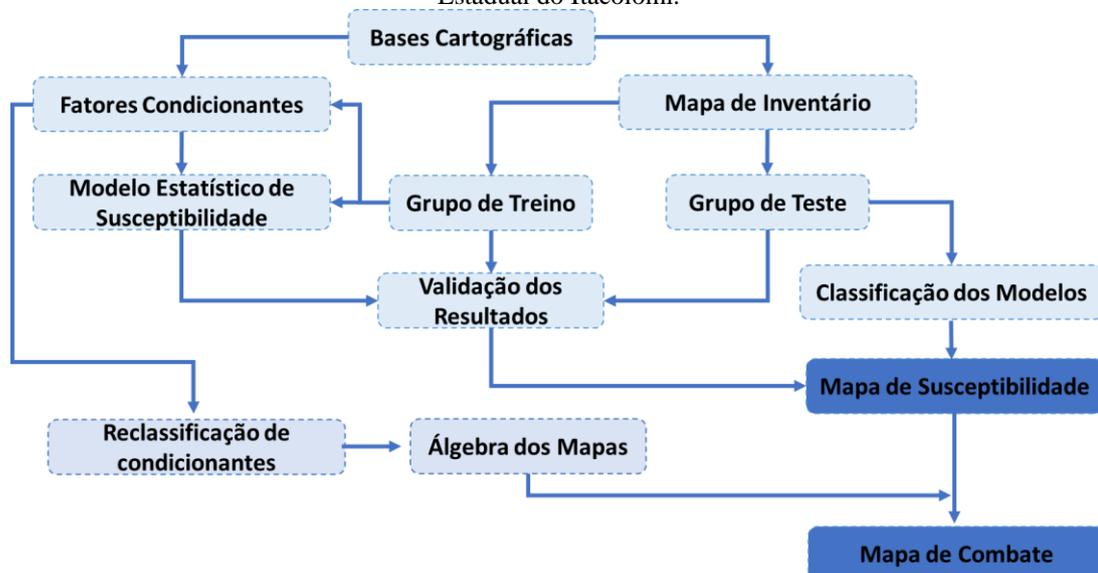
Fonte: Elaboração própria a partir de dados vetoriais obtidos a no IDE-Sisema, IBGE, 2019; Imagem do Google Earth Satélite.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Após a seleção da área de estudo, iniciou-se o levantamento bibliográfico referente ao tema central “Avaliação da susceptibilidade a incêndios florestais em Unidades de Conservação” e sobre as técnicas estatísticas, no sentido de obter uma fundamentação teórica necessária à sua realização, bem como aprofundar o conhecimento na identificação e no mapeamento das variáveis que influenciam a ocorrência e a propagação de incêndios florestais. Neste contexto, foram pesquisadas teses, dissertações e artigos, abordando aspectos teóricos e metodológicos sobre a temática analisada, e posteriormente as conclusões foram apresentadas e discutidas com integrantes da Brigada 1.

Uma vez estabelecidos os objetivos do trabalho, iniciou-se construção do banco de dados geoespaciais, que foram inventariados por meio de sites governamentais (Ministério do Meio Ambiente, IDE-Sisema, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e por meio das informações geoespaciais disponibilizadas pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF), por intermédio do gestor ambiental da Gerência de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais (Previncêndio) Rodolfo Silvério Vilela. Após inventariar e derivar todas as variáveis influentes na área de estudo, iniciou-se a modelagem estatística por meio da aplicação da técnica do Valor Informativo e da Área Abaixo da Curva (AAC) de sucesso e de predição. Os procedimentos metodológicos que foram adotados no projeto estão esquematizados na Figura 4.

Figura 4: Metodologia utilizada na elaboração do Mapa de Susceptibilidade e de Combate para o Parque Estadual do Itacolomi.



Fonte: Elaboração própria, 2019.

5.1. Banco de dados geoespacial

Os dados alfanuméricos e matriciais utilizados na modelagem foram reprojatados para o sistema de coordenadas cartesiana Universal Transversa de Mercator (UTM) e para o DATUM Sirgas 2000, zona 23S. Todas as informações foram georreferenciadas e organizadas em camadas funcionais dentro da plataforma SIG, sendo o ArcGIS 10.6 (disponível no Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia) e o QGIS 3.4 (*software* livre) os softwares utilizados para a construção do banco de dados e para os processamentos subsequentes. Todos os dados matriciais foram processados com uma resolução espacial de 5 m.

Após a aquisição dos dados primários (Tabela 3), iniciou-se a produção dos dados cartográficos secundários necessários para a elaboração dos produtos propostos. A partir da interpolação por triangulação dos valores de altitude das curvas de nível, uma rede triangulada irregular (*Triangulated Irregular Network* - TIN) foi construída. Os triângulos dessa rede obedecem ao Critério de Delaunay, que afirma que a circunferência circunscrita de cada triângulo deve apenas os três vértices de um triângulo (ERSI, [s.n.]a).

A rede irregular de triângulos foi interpolada por meio do método linear, que considera os triângulos como planos. Assim as células (*pixels*) de saída recebe uma altura com base na posição do centro da célula em relação ao triângulo, gerando assim o Modelo Digital de Elevação (MDE) (ESRI, [s.d.]b). Este modelo digital, também denominado de Mapa Hipsométrico, é um *raster* contínuo que representa as altitudes do terreno em metros.

O MDE gerado a partir de interpolações pode conter erros sistêmicos como depressões espúrias, picos anômalos e áreas sem dados, que podem ser gerados por erros de digitação, falhas de interpolação ou reamostragem (CUNHA e BACANI, 2019). A correção das depressões e vazios é realizada por meio do método de interpolação média, que considera os valores de altitudes das células vizinhas, suavizando a representação topográfica.

Tabela 3: Dados espaciais primários.

Dados	Estrutura	Fonte	Escala
Rede hidrográfica	Vetor - linha	IDE-Sisema/IGAM	1:100.000
Curvas de nível	Vetor - linha	Sem informação	Equidistantes 20 m
Vegetação	Vetor - polígono	IEF e SOS Mata Atlântica, 2009/IDE-SISEMA	Sem informação

Dados	Estrutura	Fonte	Escala
Infraestruturas antrópicas	Vetor - polígono	Vetorizado via Google Earth	-
Rede viária	Vetor - linha	IDE-Sisema	1:6.000.000
Limites das áreas incendiadas no PEIT	Vetor - polígono	IEF, 2015 a 2018	Sem informação
Limites do PEIT	Vetor - polígono	IEF, 2002	Sem informação
Imagem do satélite RapiEYE	<i>Raster</i>	GeoCatálogo do Ministério do Meio Ambiente, 2010	Resolução de 5 m

Fonte: Elaboração própria.

A partir do MDE corrigido derivou-se o *raster* de inclinação, obtido por meio da técnica das médias máximas, onde a declividade da célula é calculada por meio da taxa máxima de mudança de valor (altitude) desta célula para as células vizinhas (ESRI, [s.d.]c). A curvatura das encostas foi obtida a partir do cálculo da segunda derivada da superfície do MDE corrigido. Para a derivação de ambos os modelos considerou-se o fator de escala (Fator Z) igual a 1, pois as coordenadas X, Y e Z estão em metros.

A influência da água na ocorrência e propagação de incêndios florestais no PEIT foi analisada por meio do fluxo acumulado da rede de drenagem (FARD). Este *raster* representa a quantidade de água que flui para cada célula (*pixel*), permitindo identificar as zonas de acúmulo de água. Para a produção deste mapa é necessário derivar o *raster* de direção do fluxo. A direção do fluxo é determinada a partir do MDE corrigido, para isso os declives mais acentuados em relação às células adjacentes são definidos e a partir desta informação a direção do fluxo é obtida.

Os *rasters* derivados supracitados (altitude, a curvatura das encostas, a declividade e o fluxo acumulado) são do tipo contínuo. Logo, estes foram reclassificados com o objetivo de organizar os valores em intervalos discretos. Para cada parâmetro adotou-se três critérios diferentes de reclassificação considerando as categorizações mais comuns apresentadas na literatura estudada. Três *rasters* de cada variável foram derivados, com o objetivo de definir estatisticamente quais classes mais representam o evento na área de estudo.

A variável radiação solar foi derivada a partir do MDE corrigido com o auxílio do *software* ArcGIS 10.6. A ferramenta utilizada, *Area solar radiation*, baseia em métodos de algoritmo de visualização hemisférica desenvolvidos por Rich *et al.* (Rich 1990, Rich *et al.* 1994) e expandido por Fu e Rich (2000, 2002), segundo informações da ESRI (s.d.)d. Os parâmetros considerados foram:

- Latitude: 20,44 (padrão)
- Resolução do tamanho do céu: 200 (padrão)
- Intervalos de dia e hora: 14 dias e 0,5 horas (padrão)
- Configuração do tempo: considerou-se os anos inventariados dos ROIs e os meses de agosto e setembro, meses em que houve incêndios em todos os anos dos ROIs.
- Fator Z: 1 (padrão), pois o MDE corrigido possui as coordenadas X, Y e Z na mesma unidade
- Inclinação / aspecto: do DEM corrigido
- Divisões de zênite e azimute:
- Difuso modelo de radiação: não foi especificado o número de divisões para criar setores do céu no mapa do céu.
- Proporção difusa: 0,3 (padrão)
- Transitividade: 0,5 (padrão) para céu geralmente claro

A partir destes dados o algoritmo calcula a insolação direta, difusa e global em cada localização de superfície topográfica, gerando mapas de insolação para toda a área geográfica. Os *rasters* de radiação gerados correspondem ao total de radiação direta e difusa em WH/m² sobre a superfície topográfica estudada. Assim, gerou-se um mapa de radiação solar anual para cada ano inventariado nos ROIs e um mapa para os meses de agosto e setembro de cada ano. A partir desses *rasters* derivou-se outros, cujos valores correspondem à média anual e mensal da radiação.

Destes *rasters*, utilizou-se na modelagem apenas os itens c e d, contabilizando assim dois mapas relacionados à radiação solar. A finalidade de utilizá-los foi pautada na intenção de identificar a variação comportamental da variável no modelo, dado que ela é uma das mais importantes na ocorrência e propagação de incêndios florestais. Tais mapas também foram reclassificados de três maneiras distintas, considerando a distribuição espacial e a variação do número de classes.

As distâncias euclidianas da rede viária, da rede hidrográfica e das infraestruturas antrópicas foram obtidas de forma similar. A distância euclidiana fornece a distância de cada célula até a célula mais próxima de mesmo valor. Por conseguinte, as três variáveis descritas anteriormente foram categorizadas de formas distintas e com número de classes diferentes. Deve-se ressaltar, que no caso da rede hidrográfica, os lagos presentes na área de estudo foram incorporados à rede hidrográfica. Para isso, executou-se um *buffer* de 0,5 m, gerando assim,

rios e ribeirões com cerca de 1,0 m de largura. Considerou-se apenas a rede hidrográfica principal (Figura 3), pois esta correspondeu aos resultados do fluxo acumulado, considerado neste projeto como expressivo dada a maior possibilidade de possuir quantidade de água suficiente para o abastecimento da brigada durante o combate ao fogo.

A cobertura vegetal é uma condicionante importante no estudo do evento em questão, uma vez que ela é um dos elementos que compõe o triângulo do fogo, mencionado no subcapítulo 3.1. Para a obtenção dessa variável é muito importante separar as fitofisionomias presentes na área, pois a combustibilidade varia conforme o tipo de vegetação.

Para a obtenção destas classes foram utilizadas três a imagens do satélite RapiEYE do ano de 2010, duas do dia 19 de junho e uma do dia 7 de julho. Para a utilização destas imagens, criou-se um mosaico, que posteriormente teve a sua extensão reduzida ao tamanho da área de estudo. A partir desse mosaico resultante, aplicou-se o Índice da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI (ROUSE *et al.*, 1974), que consiste na determinação da atividade da clorofila na vegetação a partir da diferença normalizada entre as refletâncias no infravermelho próximo (NIR) e no vermelho (RED), sendo expressa pela Equação 4 (ALMEIDA e ROCHA, 2018; NOURI *et al.*, 2017; MARTINS e BAPTISTA, 2013).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

Após a elaboração do NDVI este foi reclassificado em quatro categorias, cujas fisionomias e usos do solo foram agrupados por similaridade, conforme apresentado na Tabela 4. Posteriormente, as classes de vegetação foram correlacionadas à combustibilidade vegetal, que é definida como a capacidade (facilidade) que a vegetação possui em pegar fogo. Essa característica é amplamente utilizada em estudos de susceptibilidade a incêndios florestais (SOUSA, 2013; TOMZHINSKI, 2012; FERNANDES *et al.*, 2011).

Os valores do NDVI variam entre -1 e +1, sendo que os valores elevados estão relacionados à vegetação mais densa, fotossinteticamente ativa (TOMZHINSKI, 2012), geralmente representada pela vegetação de folhagem e disposição densa. Assim, quanto maiores os valores do NDVI menores tendem a ser a combustibilidade vegetal. A categorização da cobertura vegetal e a correlação da combustibilidade vegetal foi realizada com base na literatura (SOUSA, 2013; FERNANDES *et al.*, 2011; SOUSA *et al.*, 2009) e nos conhecimentos

da autora sobre a área (Tabela 4). Na definição das classes, as áreas sombreadas foram interpretadas zonas incombustíveis ou de baixíssima combustibilidade.

Tabela 4: Categorização da combustibilidade para a área de estudo.

Valores dos <i>pixels</i> do NDVI	Uso e tipo de vegetação	Categorização da combustibilidade
-1,000 a 0,051	Áreas úmidas Áreas urbanas Afloramentos Solo exposto/área desmatada	Nulo
0,051 a 0,153	Campos rupestres e campos rupestres quartzíticos	Alta
0,153 a 0,239	Campos de altitude Vegetação rupícola montana	Média a alta
0,239 a 1,000	Floresta estacional semidecidual montana Matas de candeias Matas de galeria	Baixa

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Por fim, os vetores (polígonos) das áreas incendiadas foram convertidos em uma matriz de *pixels*. Posteriormente cada *pixel* do *raster* foi convertido em um arquivo vetorial do tipo ponto. Tal procedimento foi realizado devido aos diferentes tamanhos dos polígonos (áreas incendiadas) e por causa da variabilidade das características físicas do terreno. Ao longo da elaboração do modelo proposto, notou-se que tais variâncias estavam influenciando negativamente o desempenho do modelo. Estas conversões foram realizadas no *software* QGIS.

5.2. Elaboração do Modelo de susceptibilidade

A elaboração do modelo de susceptibilidade iniciou com a seleção das variáveis que potencialmente influenciaram na ocorrência e na propagação de incêndios na área de estudo, sendo que foram: altitude, declividade, distância euclidiana das infraestruturas antrópicas, distância euclidiana da rede viária, curvatura das encostas, NDVI (tipo de vegetação), radiação solar dos meses de agosto, radiação solar dos meses de setembro, a radiação solar média dos meses de agosto e setembro, radiação média anual e o fluxo acumulado da rede de drenagem. Conforme descrito anteriormente, a maioria destas variáveis foram reclassificadas de três formas distintas, a fim de identificar as classes que mais influenciam no evento estudado.

Antes de aplicar a técnica do Valor Informativo e da Área Abaixo das Curvas de sucesso, o inventário de incêndios em formato de ponto (vetor) foi particionado aleatoriamente em um

grupo de treino, composto por 70% dos dados, e em um grupo de teste composto por 30% dos pontos incendiados.

O grupo de treino foi utilizado na elaboração do modelo. Logo, a primeira etapa de aplicação da técnica proposta consistiu na extração da quantidade de *pixel* incendiado dentro de cada classe das variáveis supracitadas, para cada classificação. Essa extração procedeu-se em ambiente SIG (*software* ArcGIS), com o auxílio da paleta de ferramentas *Spatial Analyst Tools*. No Microsoft Excel, elaborou-se uma planilha para calcular o VI e a AAC de forma rápida e prática. Assim, com a quantidade de *pixels* de cada classe mais a quantidade de *pixels* incendiados em cada classe foi possível calcular o valor informativo dessas classes, bem como calcular as probabilidades acumuladas para elaborar a curva de sucesso e calcular a área abaixo dessa curva.

A análise sensitiva das classes e das variáveis foram realizadas a partir da elaboração da curva de sucesso, em que os VI, a quantidade de *pixels* de cada classe e a quantidade de *pixels* incendiados foram classificados em ordem decrescente, tendo como referência os VI. A seleção da melhor classificação das variáveis foi baseada no valor da AAC de sucesso. O mesmo procedimento foi efetuado para realizar a hierarquização das variáveis. Neste contexto, quanto maior o valor da AAC, mais influente é a variável. Em ambiente SIG, os valores dos *pixels* foram substituídos pelos seus respectivos VI. Em seguida processou-se a soma algébrica dos *rasters*, considerando a ordem hierárquica das variáveis segundo o grau de importância determinado anteriormente. Assim, sete modelos foram gerados. A etapa de validação dos modelos considerou, além da curva de sucesso mencionada anteriormente, a curva de predição, que fez uso do subgrupo de 30% dos pontos incendiados não utilizados inicialmente.

A escolha do modelo com melhor predição foi baseada na magnitude da AAC de Sucesso e Predição, sendo o modelo escolhido aquele que apresentou a maior AAC de sucesso e de predição. Por fim, para melhor visualização do modelo, este foi categorizado em três classes com base na curva de predição. A classe de alta susceptibilidade representou a área mais propensa à ocorrência de incêndios, com capacidade de prever 60% das futuras ocorrências. A classe de média susceptibilidade apresentou a capacidade de circunscrever 30% dos futuros eventos e a classe baixa de susceptibilidade 10% desses eventos (baixa propensão à incêndios). A classificação da susceptibilidade e a respectiva proporção de áreas incendiadas esperadas em cada classe são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Categorização do modelo de susceptibilidade para o Parque do Itacolomi de acordo com a proporção de incêndios esperados.

Classes de susceptibilidade	Incêndios esperados (%)
Alta	60
Média	30
Baixa	10

Fonte: Elaboração própria, 2020.

5.3. Elaboração do Modelo de combate

Para a elaboração do mapa de combate também realizou-se um levantamento bibliográfico associado ao grau de dificuldade de combate por brigadistas. Os brigadistas Rômulo Reis Pereira e Anderson de Freitas e Silva, ambos da Brigada 1, foram consultados sobre a seleção das variáveis e a integração delas. Também foi verificada a possibilidade de sobreposição entre as informações utilizadas.

Como não há metodologia específica para este objetivo, realizou-se apenas a integração algébrica de variáveis de fácil acesso e consideradas influentes na eficiência e eficácia de combate. A título de teste, as seguintes variáveis foram utilizadas: declividade (variável associada à propagação do fogo e à dificuldade de transpor o terreno), radiação solar média anual referente aos anos de 2012 a 2018, com exceção de 2015 (dificuldade relacionada a velocidade de propagação do fogo), vegetação (dificuldades de acesso e combate), distância euclidiana da rede viária (dificuldade/facilidade associada ao acesso a área incendiada e a área onde há fonte de água) e da rede hidrográfica composta por rios e lagos (dificuldade/facilidade associada à disponibilidade de água para uso no combate ao incêndio).

A forma de obtenção dos dados vetoriais e matriciais destas variáveis já foi citada no subcapítulo 5.1. Entretanto, os *rasters* foram reclassificados em alta, média e baixa dificuldade de acesso e/ou combate. A classificação da declividade considerou as informações da Tabela 1. Já a vegetação foi obtida a partir da classificação supervisionada do mosaico oriundo das imagens RapidEYE de 2010, cujas fisionomias vegetais consideradas foram: campos rupestres quartzíticos, campos (altitude e cerrado) e Floresta Estacional Semidecidual Montana. A classificação supervisionada considerou a continuidade, a densidade e a distribuição espacial e geográfica. Neste mapa a variável clima também foi considerada essencial no estudo, mas o seu uso também não foi possível pelos mesmos motivos já citados anteriormente.

Para facilitar a compreensão do mapa, este foi reclassificado em baixa, média e alta dificuldade de combate. A Tabela 6 apresenta os valores dos *pixels* e o respectivo enquadramento nas classes citadas.

Tabela 6: Categorização do mapa de combate ou supressão do fogo no Parque do Itacolomi de acordo com os valores dos *pixels*.

Classes de dificuldade	Valores dos <i>pixels</i>
Alta	5 a 8
Média	9 a 11
Baixa	12 a 15

Fonte: Elaboração própria, 2020.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Seleção, classificação e análise das variáveis condicionantes

A seleção dos parâmetros influentes na área de estudo envolveu a distância euclidiana das infraestruturas antrópicas e da rede viária, o fluxo acumulado da rede de drenagem, a altitude, a combustibilidade vegetal, a radiação solar, a declividade e a curvatura das encostas. Os parâmetros climáticos, apesar de serem importantes, foram desconsiderados devido à ausência de dados locais do microclima do parque.

A partir da hierarquização das condicionantes do evento estudado (Tabela 7), obtidas a partir da análise de sensibilidade que considerou 70% dos pontos incendiados, verificou-se que, de forma geral, os parâmetros mais influentes foram a altitude, a distância euclidiana das infraestruturas antrópicas e a radiação solar média anual. Os parâmetros de menor influência foram a distância euclidiana da rede viária, a curvatura das encostas, a declividade e o fluxo acumulado da rede de drenagem. A Tabela 7 mostra os valores da AAC de sucesso obtidos com o intuito de hierarquizar as variáveis estudadas, onde o maior valor corresponde a maior influência na ocorrência e na propagação do fogo na área do PEIT.

Tabela 7: Ordenação das classes mais influentes na ocorrência e propagação de incêndios.

Ordem	Altitude	DEIA	RMA	CV	DCLV	DERV	CE	FARD
AAC	0,726	0,668	0,641	0,661	0,587	0,555	0,502	0,506

Nota: DEIA: distância euclidiana das infraestruturas antrópicas; RMA: radiação média anual; CV: combustibilidade da vegetação; DCLV: declividade; DERV: distância euclidiana da rede viária; CE: curvatura das encostas; FARD: fluxo acumulado da rede de drenagem.

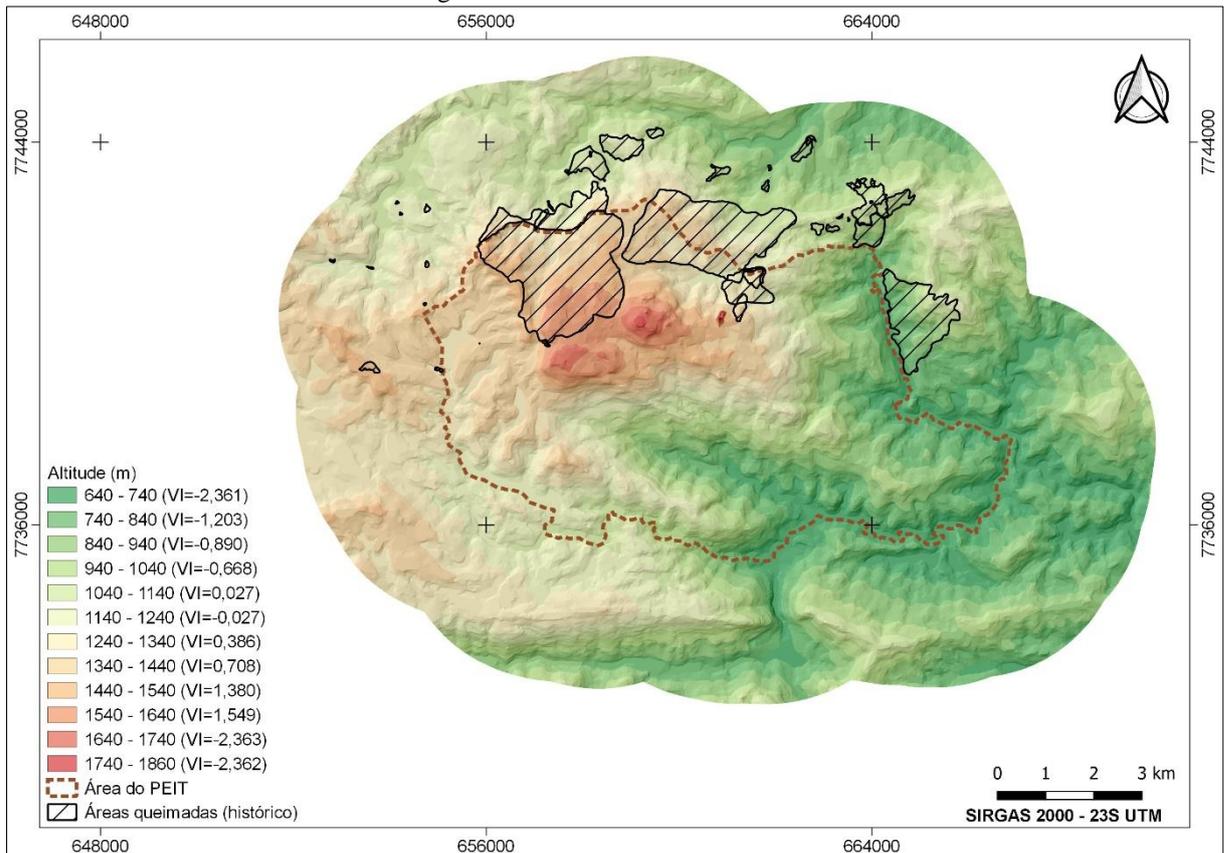
Fonte: Elaboração própria, 2020.

A altitude predominante na área de estudo varia de 640 a 1.340 m

Figura 5). Ao analisar a influência das classes, por meio da aplicação do Valor Informativo, verificou-se que as classes influentes na ocorrência e propagação dos incêndios variam de 1040 a 1140 m e de 1240 a 1640 m. A importância dessa variável está em concordância com os estudos de Vasconcelos (2013), Tomzhinski (2012) e Chuvieco e Congalton (1989), sendo que no trabalho do primeiro autor citado essa variável também recebeu o maior *score* (pela maior contribuição no evento). Ainda sobre os pontos comuns entre a presente pesquisa e as demais consultadas, notou-se que o aumento da altitude implica no aumento da susceptibilidade da área.

Deve-se frisar, que a alta significância desta condicionante, está diretamente relacionada com a variabilidade climatológica, pedológica e da vegetação. Deste modo, com o aumento da altitude, a área tende a apresentar-se mais rochosa, com solos rasos ou mesmo ausentes, o que propicia a presença de uma vegetação que exige uma menor variabilidade e quantidade de nutrientes e água.

Figura 5: Altitude da área de estudo.



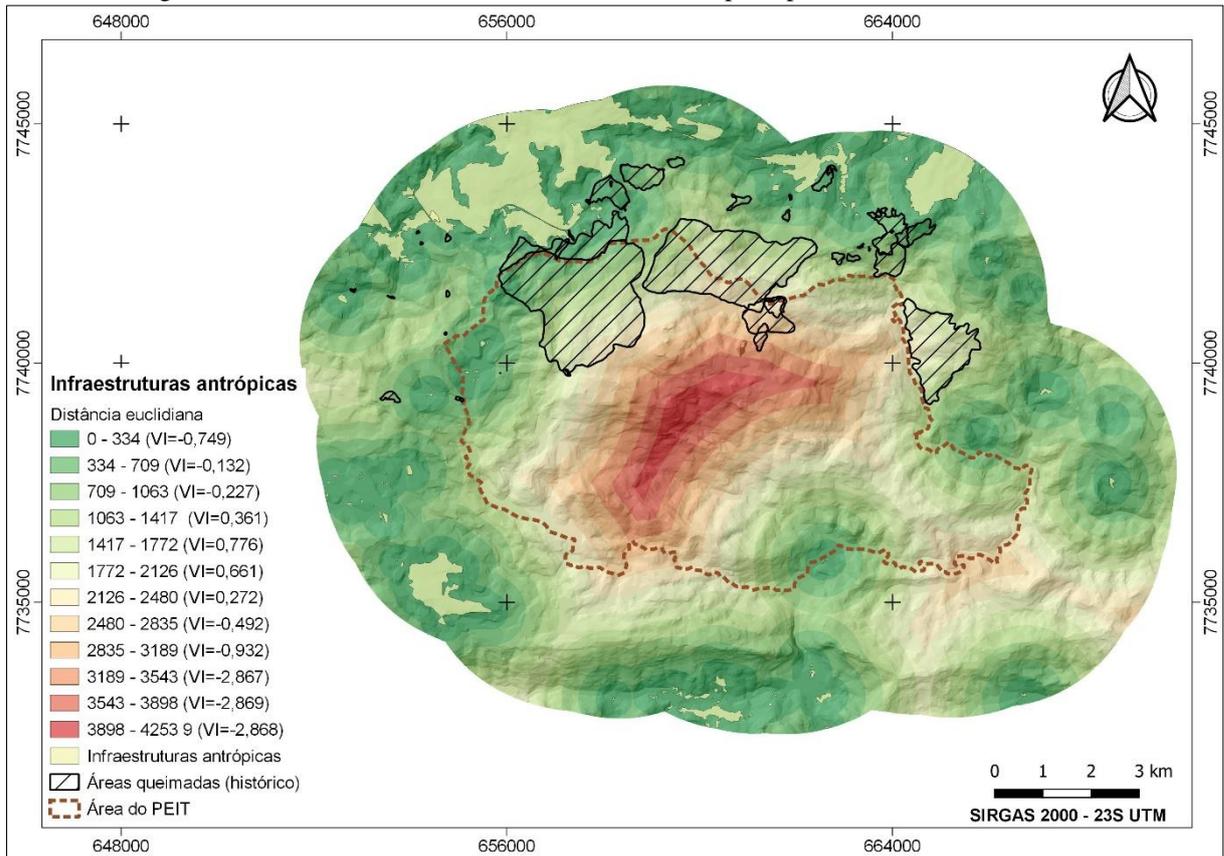
Fonte: Elaboração própria a partir de dados do INPE/TOPODATA, 2019.

A distância euclidiana das infraestruturas antrópicas também foi muito importante neste estudo, principalmente como fator causador dos incêndios, visto que a área de estudo está sob

pressão de um extenso aglomerado urbano, com destaque aos bairros Bauxita, Saramenha, Novo Horizonte e Pocinho, em Ouro Preto, e o bairro Cabanas em Mariana. Os ROIs informaram que a maioria dos incêndios registrados foram próximos de vias ou de locais com ocupação antrópica. Ainda, na literatura é unânime a relação entre presença/atividade humana e a causa de incêndios florestais (VASCONCELOS, 2013; SILVEIRA *et al.*, 2008; CHUVIECO e CONGALTON, 1989).

Ao analisar os *scores* do VI foi perceptível que as áreas mais próximas às estruturas, apesar de serem de grande importância, não evidenciaram as maiores influências. Foi verificado que as classes intermediárias, que variam de 1063 a 2480 m, corresponderam as distâncias mais influentes no processo investigado, apresentando aproximadamente 52,76% dos pontos incendiados inventariados (Figura 6). Quando se analisa as demais condicionantes e as áreas incendiadas, observa-se que a significância da classe supracitada é influenciada diretamente pelas classes mais propensas aos incêndios da altitude, da radiação solar e da declividade. Na área abrangida pelas classes em questão encontra-se a vegetação de maior combustibilidade (campo rupestre, campos rupestres quartzítico). Logo, pode-se concluir, que a distância euclidiana das infraestruturas antrópicas por si só não é decisiva na susceptibilidade da área, ou seja, a sua importância é condicionada ao um conjunto de fatores de predisposição inerentes a área em estudo, o que a torna importantíssima no estabelecimento de planos e medidas de prevenção aos incêndios, uma vez que a ação humana advém dessa variável. Logo, apesar da ação humana próxima ao parque ser o gatilho, o fogo se propaga por meio de outras variáveis.

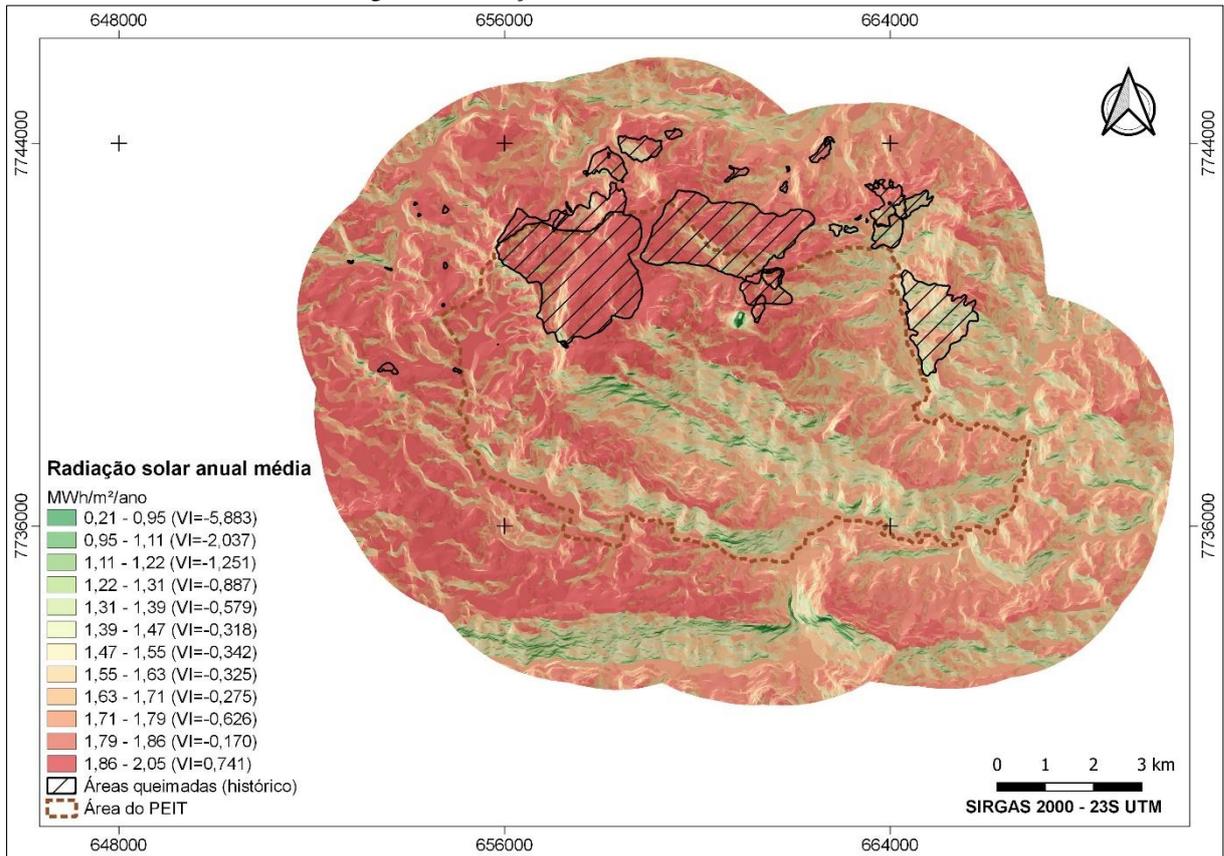
Figura 6: Distância euclidiana das infraestruturas antrópicas presentes na área de estudo.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Por meio do método da sensibilidade foi possível definir que a radiação solar média anual apresentou a maior AAC, ou seja, o ajuste entre os dados anuais e as áreas incendiadas foi mais significativo quando comparado aos dados mensais. A classe influente na ocorrência de incêndios foi a de 1,86 a 2,05 MWh/m²/ano, onde 47,57% dos pontos incendiados estão localizados (Figura 7). No estudo de susceptibilidade a incêndios no Parque Nacional do Itatiaia, Souza (2013) atribuiu o segundo maior peso (*score*) a esse fator. Além disso, ele verificou que 53% das ocorrências de incêndios ocorreram na classe alta (acima de 1,83 MWh/m²/ano). Na Figura 7 consta a radiação solar média anual dos anos de 2013, 2014, 2016 e 2018.

Figura 7: Radiação solar anual na área de estudo.

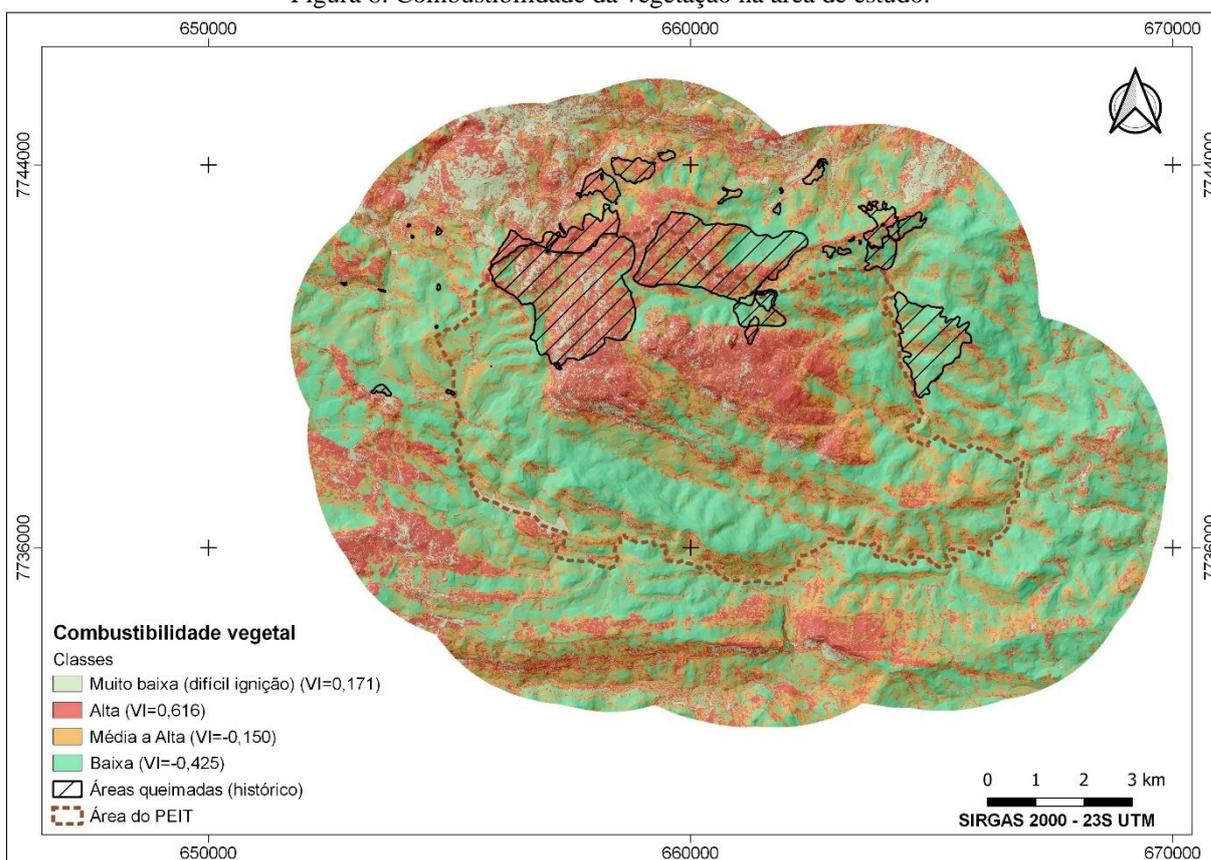


Fonte: Elaboração própria, 2020.

A combustibilidade vegetal, representada na Figura 8, também é uma variável amplamente utilizada e nesta pesquisa foi considerada a terceira mais influente na ocorrência de incêndios, com destaque para a classe alta, que é composta por uma vegetação leve e de baixa umidade. A segunda classe influente foi a de combustibilidade muito baixa (de difícil ignição).

Logo a vegetação de alta combustibilidade é a mais importante, visto que cerca de 57,34% dos pontos incendiados estavam inseridos na classe alta, o que confirma o grande impacto que os incêndios causam no ambiente composto por campos rupestres e de altitude. Por fim, nota-se que essa vegetação está na região de maior radiação solar, sendo exposta aos efeitos de ressecamento causados pela radiação (a taxa de evaporação das plantas é acelerada) (KAZMIERCZAK, 2015).

Figura 8: Combustibilidade da vegetação na área de estudo.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

Figura 9: Área campo rupestre quartzíticos (A) e de campo rupestre (B) no PEIT.

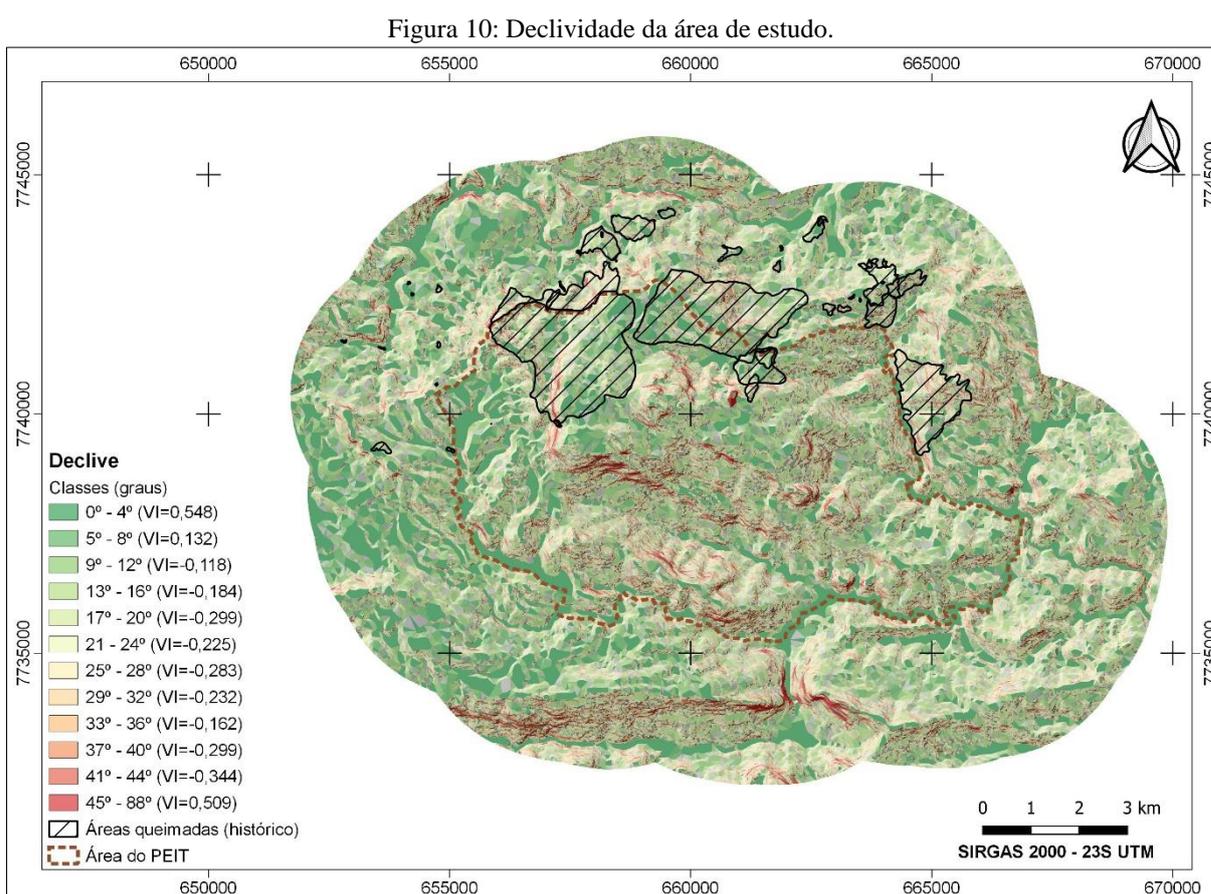


Fonte: Elaboração própria, 2020 (Foto A); Rômulo Ribon *apud* IEF, 2007a (Foto B).

A declividade é a variável topográfica dominante nos modelos de susceptibilidade a incêndios florestais, principalmente os confeccionados a partir da Análise Multicritério (VASCONCELOS, 2013; SOUSA, 2013; DIMUCCIO *et al.*, 2011; BERGONSE e BIDARRA, 2010; OLIVEIRA, 2006; FERRAZ e VETTORAZZI, 1998; CHUVIECO e CONGALTON, 1989), método em que a importância de cada variável geralmente depende do conhecimento especializado do técnico responsável. Chuvieco e Congalton (1989) descrevem a declividade como um fator crítico, pois o alta declividade do terreno está diretamente associada a propagação do fogo. Entretanto, essa condicionante foi a quinta mais influente no PEIT,

contrariando assim a relevância observada em outras áreas de estudo. A AAC de sucesso foi menor que 0,600.

Neste trabalho a declividade na faixa de 0° a 8° foi a mais importante, sendo que de acordo com a Tabela 1, nessa faixa de declividade a propagação ocorre de 1 a 1,5 vezes mais rápida. Ao contrário das demais pesquisas, o aumento da declividade não está relacionado com o aumento da susceptibilidade à incêndios, porque na área em estudo a radiação solar, altitude e o tipo de vegetação são mais influentes. Na Figura 10 pode-se observar o comportamento de tal variável na área de estudo.

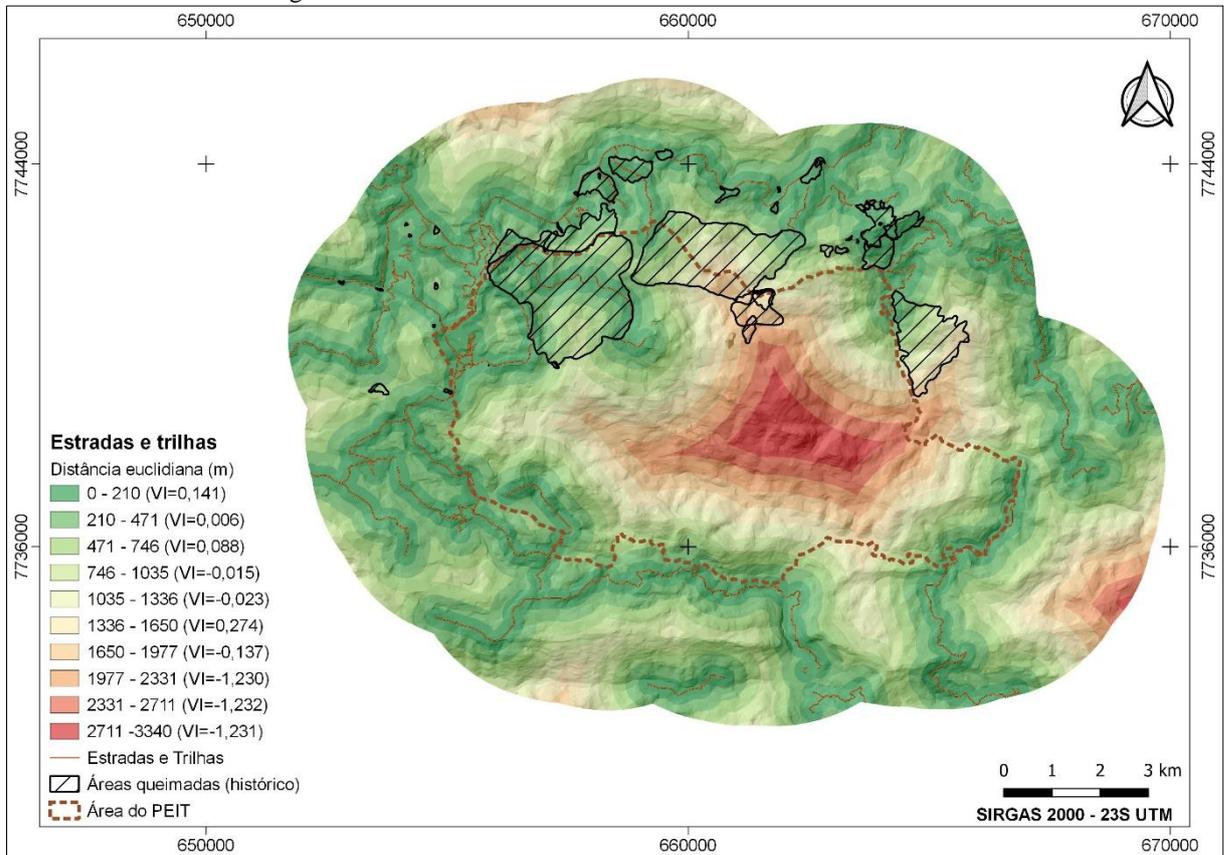


Fonte: Elaboração própria, 2020.

A distância euclidiana da rede viária também é uma variável amplamente estudada e considerada influente por alguns autores, como Oliveira (2006) e Chuvieco & Congalton (1989). Todavia, Sousa (2013), em sua análise para o Parque Nacional do Itatiaia, verificou que a densidade de caminhos e a distância à rede viária foram irrelevantes. Na análise de sensibilidade a AAC de sucesso foi igual a 0,555 e a faixa mais influente varia de 0 a 210 m (aproximadamente 50,13% dos pontos incendiados localizavam-se nesse intervalo de distância), conforme pode-se observar na Figura 11. Notou-se também que o aumento da

distância das vias foi inversamente proporcional ao aumento da susceptibilidade ao evento. Na análise dos ROIs do PEIT as vias funcionam como um fator potenciador do fogo devido à presença humana. Apesar de não contribuir para a melhoria da predição do modelo, a rede viária pode funcionar como faixa de contenção do fogo ou como fator potenciador do fogo por causa da presença humana, como afirmam Chuvieco e Congalton (1989).

Figura 11: Distância euclidiana da rede viária da área de estudo.



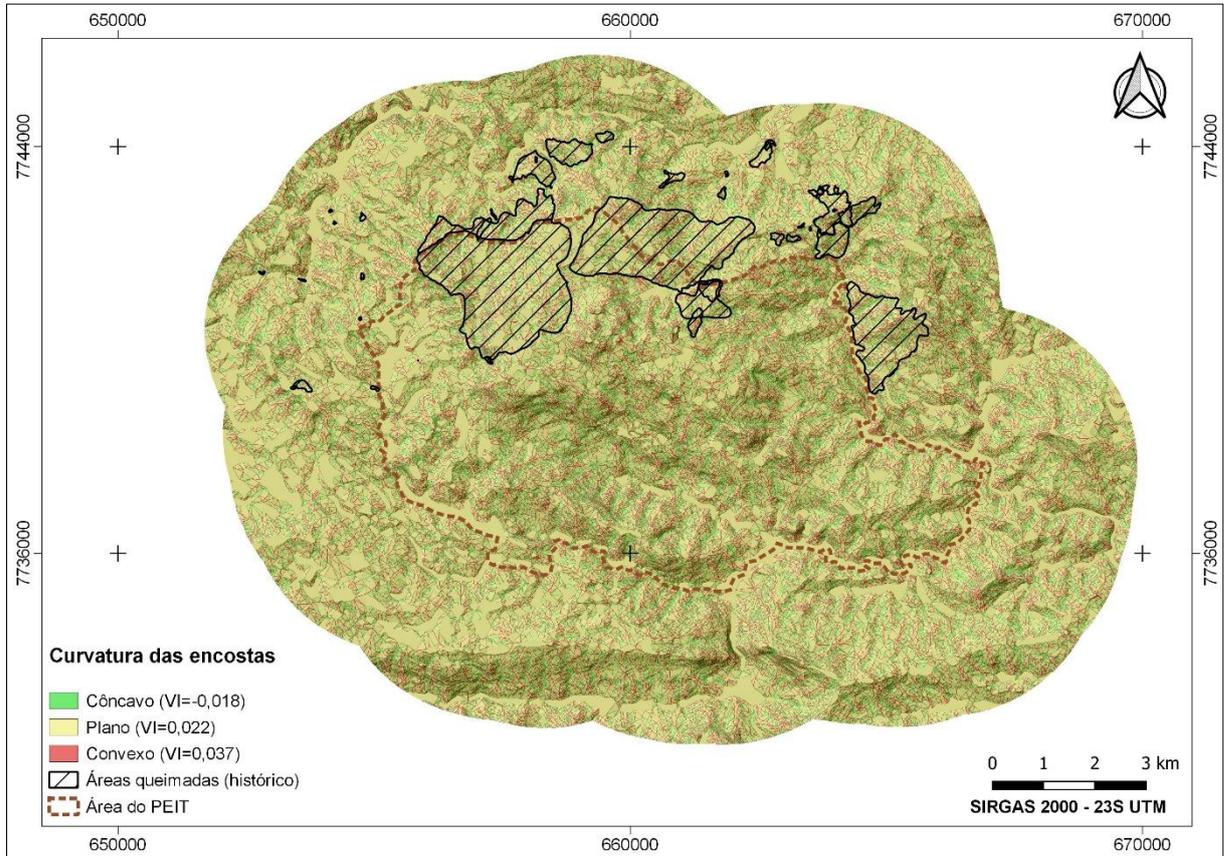
Fonte: Elaboração própria, 2020.

Na análise de sensibilidade a variável curvatura das encostas obteve a AAC de sucesso de 0,506, caracterizando o segundo menor valor dentre todos os fatores estudados. As encostas convexas apresentam maior susceptibilidade de incêndios, seguida das côncavas, como era esperado, visto que as encostas côncavas tendem a conter maior umidade que as convexas. No trabalho realizado por Souza (2013), no Parque Nacional do Itatiaia (RJ), a curvatura convexa também foi a de maior susceptibilidade de incêndios. Na Figura 12 consta a curvatura da área de estudo.

É importante destacar que essa condicionante foi estudada por Sousa (2013), Tomzhinski (2012), Fernandes *et al.* (2011) e Coura *et al.* (2009). Coura *et al.* (2009), no estudo do Maciço da Tijuca, constatou que a curvatura pode ser substituída pela radiação solar,

principalmente quando o relevo é muito acidentado e a variação da superfície das encostas é grande. Deste modo, Tomzhinski (2012), ao realizar seu estudo no Parque Nacional do Itatiaia, também optou por utilizar a radiação solar na produção do seu modelo.

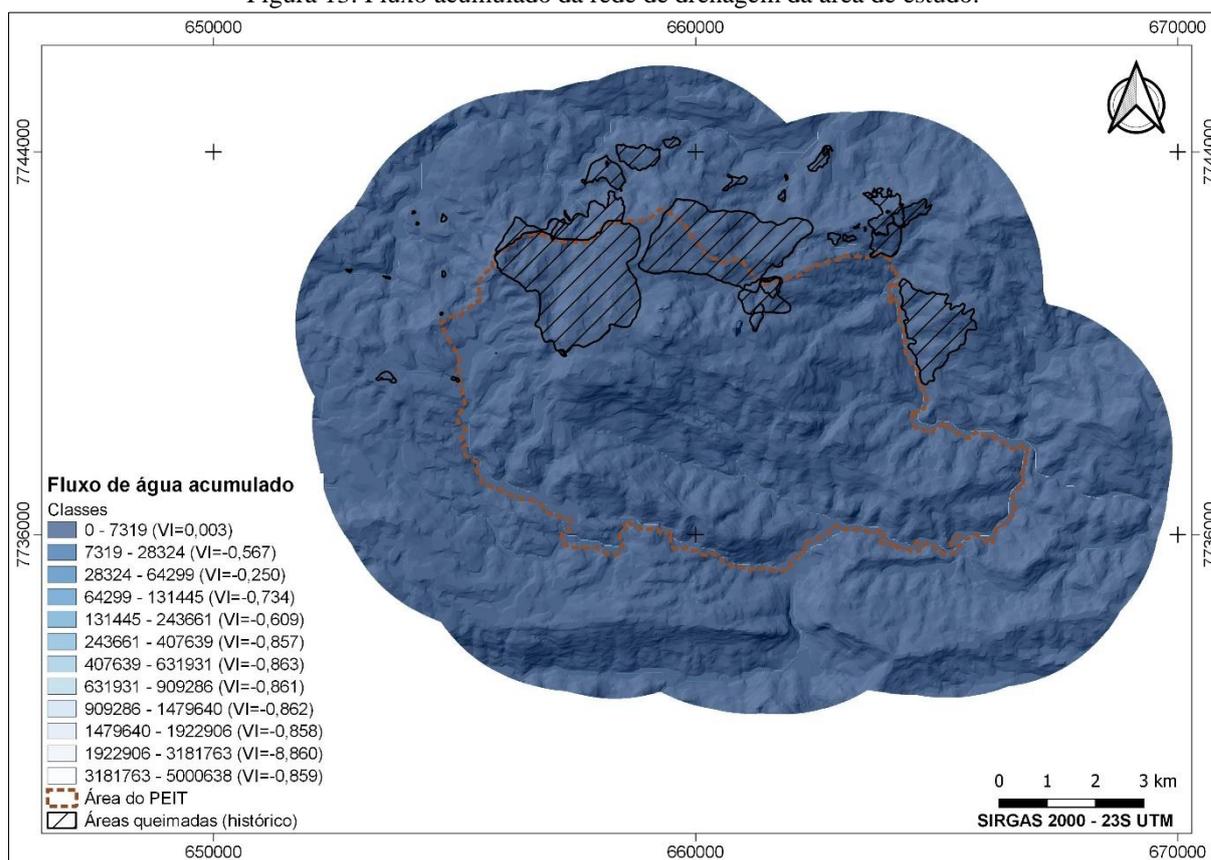
Figura 12: Curvatura das encostas da área de estudo.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

O uso da hidrografia por meio do fluxo acumulado teve como objetivo verificar se a susceptibilidade à incêndios diminui em um local onde há mais humidade. A AAC de sucesso foi 0,502, ou seja, pode-se dizer que não há relação entre a rede de drenagem e a susceptibilidade à incêndios no Parque Itacolomi. Vasconcelos (2013) também concluiu em seu estudo que essa variável é irrelevante na confecção do modelo de susceptibilidade. Entretanto essa variável é importante na definição de diretrizes de prevenção e combate à incêndios, por configurar uma barreira para o fogo. A Figura 13 possui a representação do fluxo acumulado da rede de drenagem na área de estudo.

Figura 13: Fluxo acumulado da rede de drenagem da área de estudo.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

6.2. Modelo de susceptibilidade

Definida a influência de todas as variáveis explicativas do evento estudado, fez-se a elaboração de 7 modelos de susceptibilidade, que levaram em consideração a combinação sequencial dos parâmetros com base na hierarquia definida na Tabela 6. O modelo final produzido foi categorizado em alta, média e baixa susceptibilidade, integrando os condicionantes que originaram o resultado considerado mais robusto.

Os três primeiros modelos foram considerados os melhores entre os sete produzidos, visto que os valores da AAC de sucesso e predição foram mais elevados, com resultados acima de 0,770 (Tabela 7). O Modelo 1 pode ser considerado quantitativamente melhor, pois apresenta as maiores AAC, que traduzem um bom ajuste do modelo aos dados (AAC de sucesso) e uma boa capacidade preditiva (AAC de predição). Para se ter uma ideia da capacidade desse modelo, 30% da área de estudo é capaz de explicar aproximadamente 69% dos incêndios. No Modelo 2 há uma queda nos valores da AAC de sucesso e predição, o que indica que a variável radiação

anual média não agregou qualidade preditiva ao modelo e causou a depreciação do reconhecimento das zonas mais propensas ao evento.

O Modelo 3, que integrou a altitude, a distância das infraestruturas antrópicas, a radiação média anual e a combustibilidade da vegetação, apresentou um resultado próximo ao modelo 1 e superior ao modelo 2, evidenciando que a combustibilidade da vegetação agregou valor à simulação. Na literatura, Kazmierczak (2015), Sousa (2013), Tomzhinski (2012), Fernandes *et al.* (2011), Coura *et al.* (2009), Coura *et al.* (2009) e Chuvieco e Congalton (1989) afirmam a importância dessa condicionante no estudo. Ainda, de acordo com ICMBIO (2010), a vegetação, aqui traduzida na sua combustibilidade, é fundamental no entendimento do comportamento do fogo, conhecimento necessário para um combate eficiente, eficaz e seguro.

No Modelo 4 pode-se verificar a diminuição da qualidade em função da adição da declividade, sendo observada uma queda de cerca de 2,44% no valor da AAC de sucesso e de predição. Ademais, as demais variáveis (DERV, CE e FARD), quando integradas ao modelo de susceptibilidade, foram irrelevantes.

Tabela 8: Resultado dos modelos de susceptibilidade obtidos por meio da combinação dos fatores influentes.

Modelo	Integração	Curva de Sucesso (AAC)	Curva de Predição (AAC)
1	ALT + DEIA	0,793	0,782
2	ALT + DEIA + RMA	0,777	0,777
3	ALT + DEIA + RMA + CV	0,780	0,779
4	ALT + DEIA + RMA + CV + DCLV	0,761	0,760
5	ALT + DEIA + RMA + CV + DCLV + DERV	0,763	0,762
6	ALT + DEIA + RMA + CV + DCLV + DERV + CE	0,763	0,763
7	ALT + DEIA + RMA + CV + DCLV + DERV + CE + FARD	0,763	0,763

Nota: ALT: altitude; DEI: distância euclidiana das infraestruturas antrópicas; RMA: radiação média anual; CV: combustibilidade da vegetação; DCLV: declividade; DERV: distância euclidiana da rede viária; CE: curvatura das encostas; FARD: fluxo acumulado da rede de drenagem.

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Outra forma de análise dos resultados dos modelos envolve o computo da evolução territorial (áreas) das zonas de susceptibilidade. Os resultados da Tabela 9 mostram que a melhor distribuição das áreas está presente no Modelo 1, que minimizou a zona de alta susceptibilidade e maximizou a zona de baixa susceptibilidade, mantendo constantes as capacidades preditivas de cada classe. O Modelo 3 apresentou a segunda menor área de alta

susceptibilidade. As variações das áreas dos modelos com AAC iguais ou similares encontram uma explicação nas oscilações das curvas de sucesso e predição ao longo de sua trajetória.

Tabela 9 - Progresso da taxa de sucesso e predição e a distribuição das áreas das classes de susceptibilidade no PEIT.

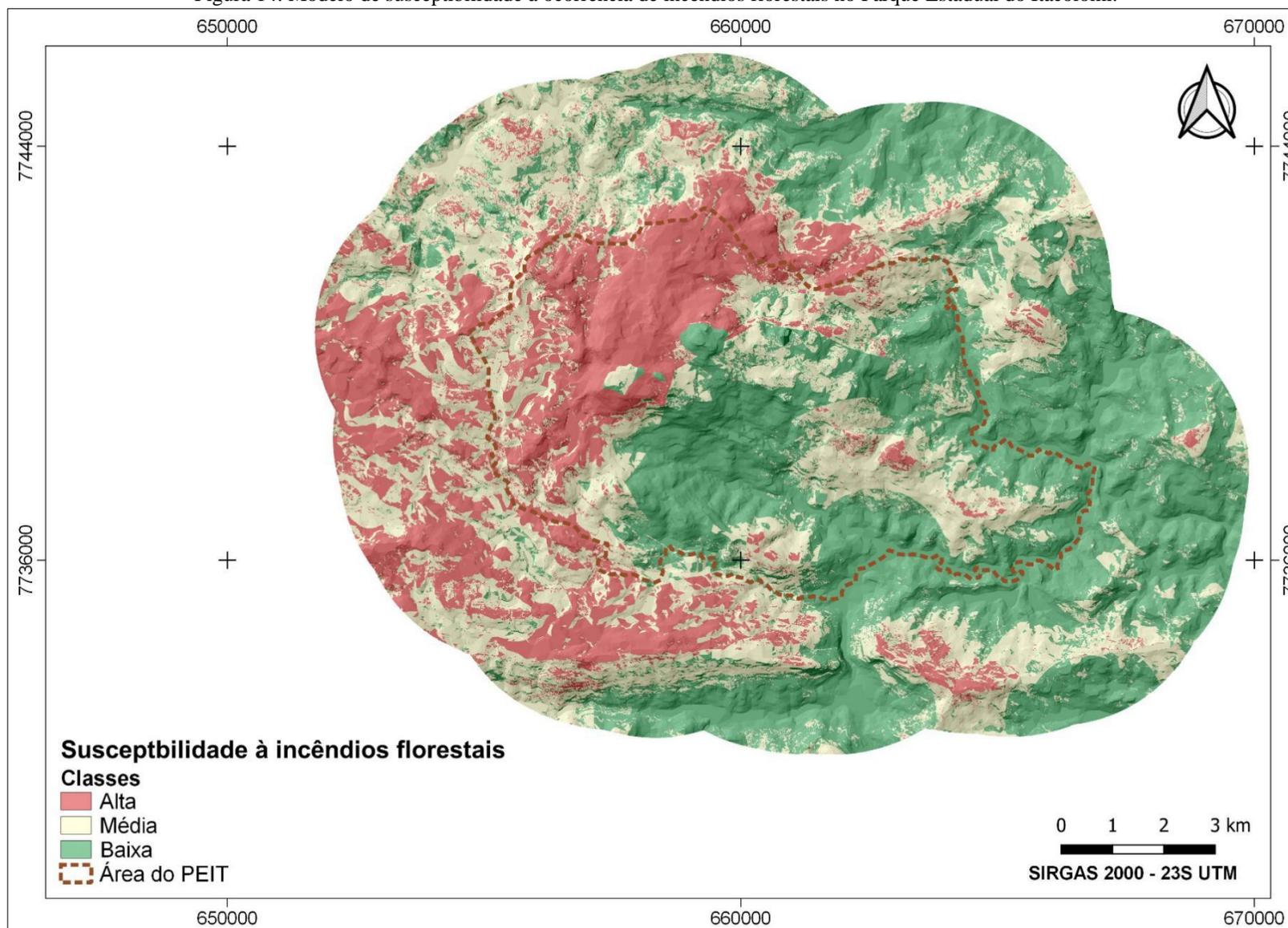
Identificação dos modelos	Curva de Sucesso (AAC)	Curva de Predição (AAC)	Área (km ²)		
			Alta	Média	Baixa
Modelo 1	0,793	0,782	37,3	61,0	92,4
Modelo 2	0,777	0,777	43,3	61,7	85,6
Modelo 3	0,780	0,779	40,1	70,1	80,4
Modelo 4	0,761	0,760	40,2	40,6	69,6
Modelo 5	0,763	0,762	41,4	35,9	73,1
Modelo 6	0,763	0,763	41,2	36,3	72,8
Modelo 7	0,763	0,763	41,2	36,2	72,9

Fonte: Elaboração própria, 2020.

Comparando os resultados quantitativos expostos e considerando as circunstâncias de ocorrência dos incêndios na área de estudo, bem como a literatura consultada, optou-se por julgar o Modelo 3 (Figura 14) mais apto à representar a susceptibilidade a ocorrência/propagação de incêndios florestais no PEIT.

O Modelo 3 é uma opção mais conservadora que o Modelo 1 e quantitativamente melhor que o Modelo 2, além de incluir fatores condicionantes considerados influentes na literatura. Em outras palavras, o fato do setor de alta e média susceptibilidade do terceiro modelo ser, respectivamente, 0,075% e 0,15% maior que o do primeiro modelo e o setor de baixa susceptibilidade ser 0,13% menor, neste trabalho foi considerado pouco significativo, visto que a inserção da combustibilidade resulta numa maior destreza para o reconhecimento das zonas mais propensas à ocorrência do evento.

Figura 14: Modelo de susceptibilidade à ocorrência de incêndios florestais no Parque Estadual do Itacolomi.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

No que diz respeito à interpretação do modelo de susceptibilidade, vale ressaltar que o setor de alta susceptibilidade corresponde à área responsável por prever 60% das futuras zonas incendiadas, onde a propensão do fogo iniciar e/ou da área ser atingida é elevada (maior pré-disposição). A área de baixa susceptibilidade apresenta características que resultam em uma menor probabilidade de ocorrência/propagação, o que não quer dizer que essa região não possa ser atingida. Logo, nessa região são esperadas 10% de zonas incendiadas em um evento futuro.

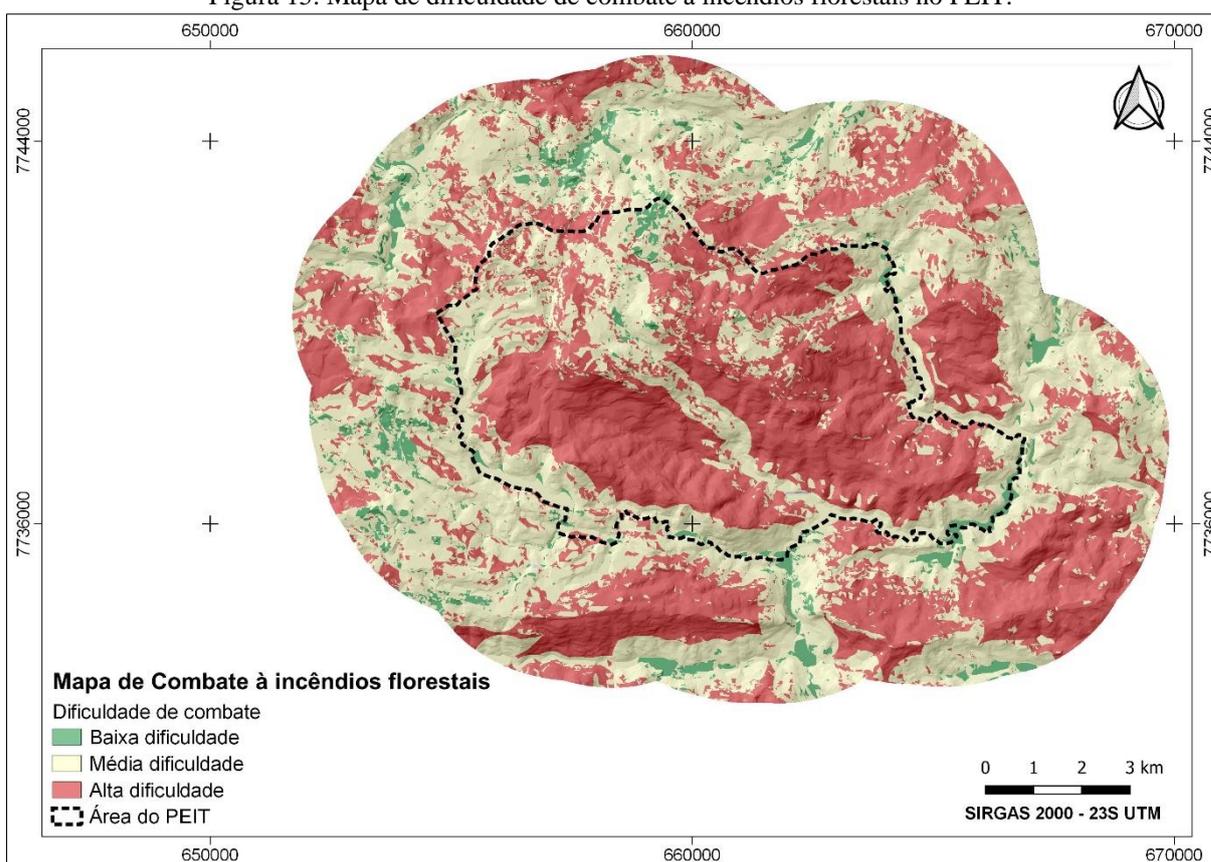
Em suma, a aplicabilidade de técnicas puramente estatísticas, reafirmou informações encontrada em outros estudos de incêndios florestais, onde as variáveis altitude, ocupação humana e tipologia da vegetação foram consideradas influentes na ocorrência e propagação de incêndios. Em contrapartida, o parâmetro de declividade, tido como um dos mais importantes na análise de susceptibilidade, foi considerado uma variável de menor influência na ocorrência/propagação do evento no Parque Estadual do Itacolomi. Outra ressalva consiste na utilização do fluxo acumulado da rede de drenagem, que no modelo estudado não resultou na melhora da sua capacidade preditiva. Entretanto, tanto a declividade, como a rede hidrográfica são fatores importantes, que nessa pesquisa foram utilizados na produção do Mapa de Combate a incêndios florestais, já que essas condicionantes influenciam diretamente no combate e ou supressão do fogo.

6.3. Modelo de combate aos incêndios florestais no PEIT

O combate é uma atividade perigosa que requer planejamento prévio e análise contínua da progressão das linhas de fogo, uma vez que essa pode sofrer mudança repentina de direção e intensidade. Nesse contexto, conforme o ICMBIO (2010), o combate aos incêndios florestais possui a fase de detecção, que consiste no conhecimento do incêndio e na mobilização de pessoal; a fase de reconhecimento, que reúne informações da área afetada, avaliando as dificuldades e facilidades locais (fontes de água, acessos, etc.) para posteriormente elaborar o plano de ação de combate. Nessa fase são definidos os equipamentos de combate mais adequados e as formas de atuação. Nesse contexto, o mapa de combate foi produzido com a finalidade de nortear as ações supracitadas, na forma de uma primeira análise, como também auxiliar as ações de prevenção na época de estiagem, na forma de um instrumento de priorização.

A Figura 15 evidencia o predomínio de condições de média e alta dificuldade de combate (cerca de 52% e 44% da área), respectivamente, o que pode ser explicado pela presença de características peculiares topológicas e de vegetação, que condicionam situações que demandariam mais esforço e equipamentos de combate. Isso é perceptível quando se analisa os ROIs, onde há relatos que as subidas íngremes e as condições climáticas (vento) dificultaram a ação dos brigadistas. Deve-se ressaltar que nesses relatórios, junto a essas dificuldades, é recorrente a falta de EPIs (Equipamentos de proteção individuais) e/ou o mau-estado de conservação deles.

Figura 15: Mapa de dificuldade de combate à incêndios florestais no PEIT.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

No que se refere às variáveis empregadas, aos pesos atribuídos e as classificações adotadas para a produção do mapa (Figura 15), deve-se considerar a simplicidade da metodologia empregada, visto que o mais indicado seria utilizar técnicas mais robustas, como a AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para refinar a classificação dessas variáveis conforme a opinião de brigadistas. A técnica sugerida é estruturada para a tomada de decisões complexas em que diversas variáveis ou critérios estão presentes, sendo que o conhecimento do especialista sobre a temática e a área são pontos fundamentais para o sucesso de sua aplicação.

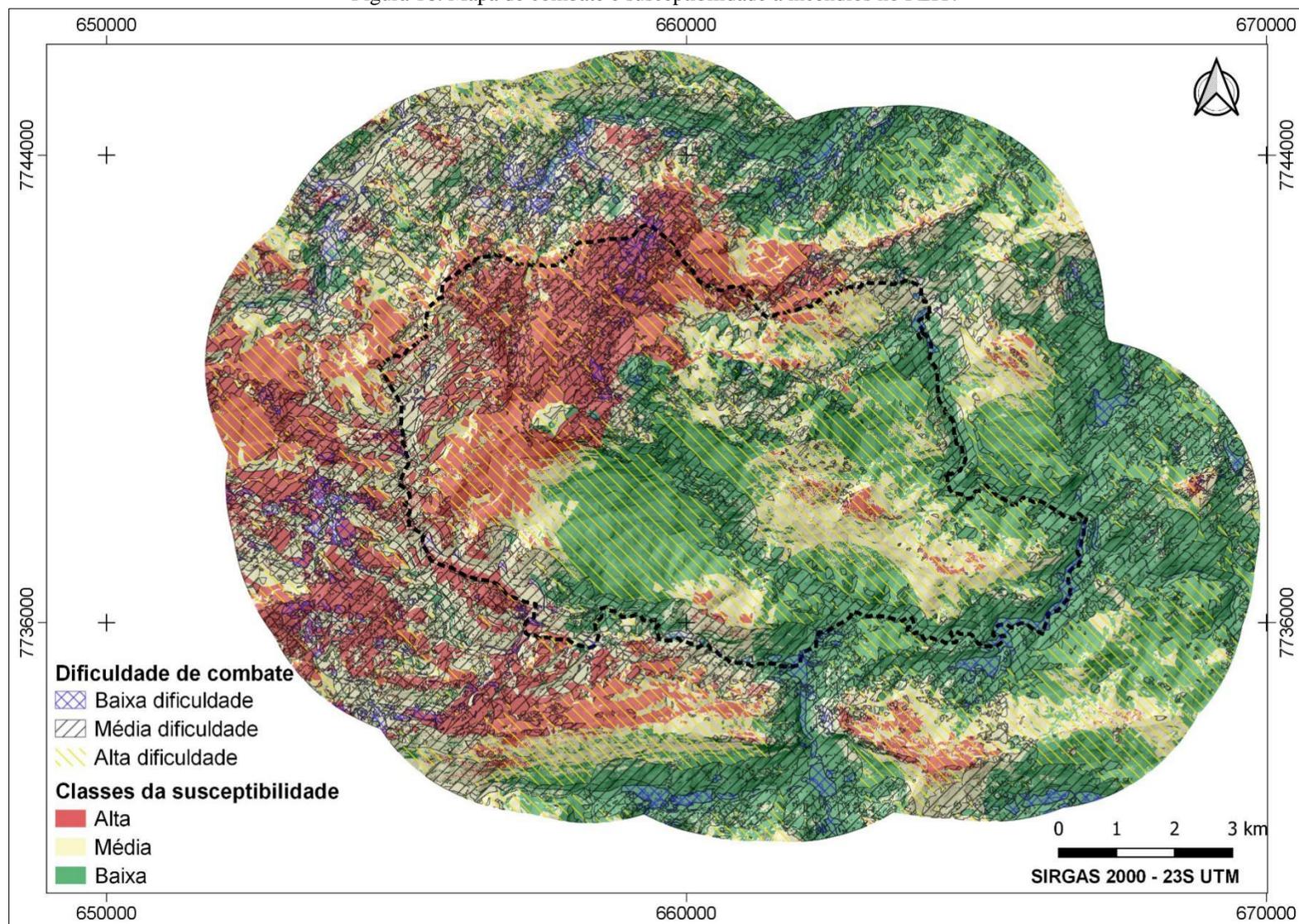
A complexidade do mapa de dificuldade de combate está ligada a interdependência e variabilidade das condicionantes climáticas e das características intrínsecas da área, cuja representação da dinâmica e dependência não são representadas nessa metodologia. Logo, sugere-se que estudos de novas metodologias sejam realizados de forma a refinar e melhorar as nuances envolvidas nessa problemática.

A Figura 16 apresenta a integração dos mapas de combate e susceptibilidade. Nessa figura pode-se perceber que a área de baixa susceptibilidade coincide majoritariamente com a zona de média dificuldade de combate, variando para alta em alguns locais. Apesar dessa área possuir 10% de probabilidade de ser atingida pelo fogo, o acesso a ela apresenta um nível de complexibilidade mediano e os brigadistas devem estar preparados para enfrentarem dificuldades de acesso por terra.

A atenção deve ser voltada, principalmente, as áreas de alta susceptibilidade à incêndios, visto que nessas zonas predominam altas e médias dificuldades de combate, o que certamente significa que as características dessas áreas exigem mais planejamento durante as épocas de estiagem e durante o combate do fogo. Isso pode indicar, por exemplo, a necessidade de mais tipos EPIs, carros 4x4 e até o auxílio de helicópteros para acesso e/ou “*Air Tractor*” para jogar água na área. Ainda, esse mapa permite entender também as condições do caminho até a área incendiada, ou seja, às vezes a área acometida pelo fogo possui baixa dificuldade de combate, entretanto o caminho da base até ela possui diversas dificuldades que devem ser consideradas.

Dessa forma, a combinação desses mapas permite identificar as zonas de maior probabilidade de serem acometidas pelo fogo e nortear as ações dos brigadistas. Tais produtos podem servir para orientar, de forma preliminar e levando em consideração a escala da análise, a pré-seleção de formas e rotas de combate (base-área incendiada), bem como a implantação de ações de prevenção em lugares de alta susceptibilidade a incêndios florestais e elevada dificuldade de acesso/combate, além de permitir a seleção de áreas prioritárias para o detalhamento dos modelos de previsão.

Figura 16: Mapa de combate e susceptibilidade a incêndios no PEIT.



Fonte: Elaboração própria, 2020.

7. CONCLUSÃO

As Unidades de Conservação foram instituídas pelo SNUC por serem de extrema relevância na preservação da biodiversidade e na manutenção de serviços ecológicos. A propagação de incêndios florestais é uma das causas responsáveis pela redução da biodiversidade. Pensando na minimização desse problema, os modelos de susceptibilidade à incêndios são instrumentos que podem servir como ponto de partida para a elaboração de planos e programas de prevenção e proteção contra incêndios florestais, cujo principal objetivo é evitar a ocorrência do evento, principalmente nos períodos de seca, quando o número de focos e os prejuízos são maiores. Já os mapas de combate podem servir como ferramentas de orientação e informação preliminar para equipe de brigada, visto que as informações fornecidas podem contribuir previamente na seleção de estratégias mais adequadas, seguras, eficientes e eficazes.

Assim, a aplicação da técnica estatística do Valor Informativo se mostrou eficiente, passível de validação e menos subjetiva quando comparada as tradicionais combinações qualitativas de mapas baseadas em operações algébricas, onde o operador, baseado no seu conhecimento especialista, atribui pesos (*scores*) aos parâmetros. Como consequência disso, para distintas áreas ou Unidades de Conservação, a aplicação da metodologia estatística atribuirá às variáveis diferentes *scores*, de tal modo que a sua significância no evento também variará. Essa particularidade é uma característica dessa abordagem e foi comprovada neste estudo, fato evidenciado, por exemplo, pela análise da relevância da declividade, que mostrou-se menos importante quando comparada à declividade de outras áreas e modelos.

O processo de produção do modelo de susceptibilidade reafirmou a importância que os estudiosos dão ao tipo de vegetação, à altitude e, principalmente, à influência da ocupação antrópica. De forma geral, o desempenho do modelo final de susceptibilidade a incêndios florestais do Parque Estadual do Itacolomi foi considerado adequado, apesar de não ser o melhor modelo quantitativo. Ele considerou a combustibilidade vegetal, a altitude, a distância euclidiana das infraestruturas antrópicas e a radiação média anual.

Em relação à produção do mapa de dificuldades de combate, apesar elaborado por meio de uma metodologia simplista, espera-se que ele possa nortear novos estudos na área.

Em suma, o trabalho apresentou resultados satisfatórios, entretanto recomenda-se que para o seu aperfeiçoamento, trabalhos futuros sejam realizados, principalmente em escalas mais detalhadas, e os fatores climáticos, em termos de microclima, sejam inseridos na confecção dos

modelos. Também se recomenda a obtenção de imagens de satélite de maior resolução, assim como a aplicação de tratamentos com a finalidade de extinguir inconsistências relacionadas às sombras. A utilização de outros fatores de avaliação e classificação do estado da vegetação, como o índice de umidade e/ou a combinação do índice de umidade e de combustibilidade também é um procedimento que pode ser adotado para melhorar o modelo de susceptibilidade.

Quanto a confecção do mapa de combate, recomenda-se a inserção de novas variáveis e a reclassificação dessas variáveis com base na aplicação de alguma técnica mais robusta, como a AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Por fim, deve-se lembrar que os mapas produzidos nesta pesquisa podem e devem ser recalibrados de tempos em tempos com a inclusão de novas áreas incendiadas, para que o modelo se aproxime, o máximo possível, do real e os erros sejam minimizados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÁMEK, M.; BOBEK, P.; HADINCOVÁ, V.; WILD, J.; KOPECKÝ, M. Forest fires within a temperate landscape: A decadal & millennial perspective from a sandstone region in Central Europa. **Forest Ecology & Management**, v. 336, p. 81–90, 2015.

ALMEIDA, J. R. R. A; ROCHA, K. S. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, PRI, e CO₂flux na caracterização da cobertura vegetativa da área de proteção ambiental Raimundo Irineu Serra. *In*: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 7, 2018, Jardim-MS. **Anais [...]**, Jardim-MS: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 985-994. Disponível em: <https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/Anais-Geopantanal/pdfs/p151.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2019.

ANDRADE, L. N. **Caracterização hidrológica e hidrogeoquímica do Parque Estadual do Itacolomi – Ouro Preto/MG**. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental e conservação de Recursos Naturais) – Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

AQUINO, J. N. **Uso de técnicas de modelagem e análise espacial na seleção de áreas ideais para construção de aterros sanitários em regiões metropolitanas densamente povoadas**. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Departamento de Cartografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

BARELLA, C. F. **Abordagens Estatísticas Aplicadas ao Mapeamento de Susceptibilidade a Movimentos de Massa: Análise de Diferentes Técnicas no Contexto do Quadrilátero Ferrífero**. Dissertação (Doutorado em Geotecnia) - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

BARLOW, J.; PARRY, L.; GARDNER, T. A.; FERREIRA, J.; ARAGÃO, L. E. O. C.; CARMENTA, R.; BERENQUER, E.; VIEIRA, I. C.G; SOUZA, C.; COCHRANE, M. A. The critical importance of considering fire in REDD+ programs. **Biological Conservation**, n. 154, p. 1–8, 2012.

BASCONCELOS, M. F. O que são campos rupestres e campos de altitude nos topos de montanha do Leste do Brasil? **Revista Brasileira de Botânica**, v. 34, n° 2, p. 241-246, 2011.

BERGONSE, R. V.; BIDARRA, J. M. Probabilidade bayesiana e regressão logística na avaliação da susceptibilidade de ocorrência de incêndios de grande magnitude. **Finisterra – Revista**

Portuguesa de Geografia, v. 45, n. 89, p. 79-104, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.18055/Finis1353>. Acesso em: 12 dez. 2019.

BOHNENBERGER, J. C.; PIMENTA, J. F. P.; ABREU, M. V. S.; COMINI, U. B.; CALIJURI, M. L.; MORAES, A. P.; PEREIRA, I. S. Identificação de áreas para implantação de usina de reciclagem de resíduos da construção e demolição com uso de análise multicritério. **Ambiente Construído** [On-line], ISSN 1678-8621. v.18, n. 1, Porto Alegre Jan./Mar. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000100222>. Acesso em: 30 jul. 2018.

BRASIL. **Lei 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. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm. Acesso em: 12 nov. 2017.

BUI, D. T.; LE, K. T. T.; NGUYEN, V. C.; LE, H. D.; REVHAUG, I. Tropical Forest Fire Susceptibility Mapping at the Cat Ba National Park Area, Hai Phong City, Vietnam, Using GIS-Based Kernel Logistic Regression. **Remote Sensing**, v. 8, n. 4, 347, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs8040347>. Acesso em: 30 jul. 2018.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - CEPED UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais – 1991 a 2012**. 2 ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED, 2013, p. 98 A 101

CHUNG, C.F.; FABBRI, A.G. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 65, n. 12, p. 1389-1399, 1999.

CHUVIECO, E.; CONGALTON R. G. Application of remote sensing and Geographic Information Systems to Forest fire hazard mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 29, p. 147-159, 1989.

CLASSIFICAÇÃO E CODIFICAÇÃO BRASILEIRA DE DESASTRES - COBRADE. Disponível em: http://www.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Cobrade_com-simbologia.pdf. Acesso em: 5 dez. 2019.

CUNHA, ELIAS R.; BACANI, VITOR M. Influência da resolução do MDE na caracterização morfológica de bacia hidrográfica. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 59, p. 1029-1043, 2019.

DIMUCCIO L. A.; FERREIRA, R.; CUNHA, L.; ALMEIDA, C. DE A. Regional forest-fire susceptibility analysis in central Portugal using a probabilistic ratings procedure and artificial

neural network weights assignment. **International Journal of Wildland Fire**, n. 20, p. 776-791, 2011. Disponível: <https://doi.org/10.1071/WF09083>. Acesso em: 20 de jul. de 2018.

DRUMMOND, G. M.; MARTINS, C. S.; MACHADO, A. B. M.; SEBAIO, F. A.; ANTONINI, Y (org.). **Biodiversidade em Minas Gerais: síntese das áreas prioritárias de Minas Gerais**. Fundação Biodiversitas: Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <http://www.biodiversitas.org.br/atlas/sintese.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2020.

DRUMMOND, G. M.; MARTINS, C. S.; MACHADO, A. B. M.; SEBAIO, F. A.; ANTONINI, Y (Org.). **Biodiversidade em Minas Gerais: síntese das áreas prioritárias de Minas Gerais**. Fundação Biodiversitas: Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <http://www.biodiversitas.org.br/atlas/sintese.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2020.

ESRI. ARCGIS Desktop. **¿Qué es una superficie TIN?** [s.d.]a. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm>. Acesso em: 14 fev. 2021.

ESRI. ARCGIS Desktop. **Cómo funciona de TIN a ráster** [s.d.]b. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-tin-to-raster-3d-analyst-works.htm>. Acesso em: 14 fev. 2021.

ESRI. ARCGIS FOR DESKTOP. **Cómo funciona Pendiente** [s.d.]c. Disponível em: https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm#ESRI_SECTION1_C81D5590295342FF8C730744027A96C6. Acesso em: 15 fev. 2021.

ESRI. ARCGIS FOR DESKTOP. **Cómo se calcula la radiación solar** [s.d.]d. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-solar-radiation-is-calculated.htm>. Acesso em: 15 fev. 2021.

ESRI. ArcGIS PRO desktop. Version 2.5.0. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute; 2020.

FAGUNDES, V. J. **Incêndios florestais em Unidades de Conservação de proteção integral da região metropolitana de Belo Horizonte, MG**. Dissertação (Mestrado em Restauração de Ecossistemas Florestais) – Departamento de Geografia, Universidade Federal De Lavras. Lavras, 2016.

FERNANDES, M. C.; COURA, P. H. F.; SOUSA, G. M.; AVELAR, A. S. Mapeamento geoecológico de susceptibilidade à ocorrência de incêndios no Estado do Rio de Janeiro. *In*:

Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 15., 2011, Curitiba. **Anais [...]**, Curitiba: INPE, 2011. p. 7988-7995. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/06.30.12.29/doc/p0395.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2019.

FERRAZ, S. F. DE B; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas (SIG). **Scientia Forestalis**, n. 53, p. 39-48, 1998.

FERREIRA, A. R. R. **Sistema de informação geográfica e susceptibilidade a incêndio florestal: análise de metodologia em ambiente SIG**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento) - Departamento de Geografia, Universidade do Porto, Porto, 2010.

FERREIRA, J. M. S.; FERREIRA, P. S.; MORAIS, Y. C. C; V. P.; FRANÇA, L. M. DE A.; GALVÍNCIOV, J. D. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na detecção de mudanças espaço-temporais das áreas de vegetação de mangue em Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 6, n. 3, p. 356-372, 2013.

Google Earth Pro 7.3.2.5495 (64-bit). Google LLC, 2018.

GREENBAUM, D.; BOWKER, M. R., DAU, I.; DROPSY, H.; GREALLY, K. B., MCDONALD, A. J. W.; MARSH, S. H.; NORTHMORE, K.J.; O'CONNOR, E.A.; PRASAD, S.; TRAGHEIM, D. G. Rapid methods of landslide hazard mapping: Fiji case study. **British Geological Survey – BGS**, Technical Report WC/95/28, Keyworth, Nottingham, United Kingdom, 1995. Disponível em: <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/9374/1/WC95028.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2020.

GUZZETTI, F. **Landslide Hazard & Risk Assessment**: concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslides, for landslides susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation. Dissertation (PhD em Mathematchi-naturwissenschaftlichen Fakultät) - Univestität Bonn, Bonn, Germany, 2005.

GUZZETTI, F., CARRARA, A., CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, p. 181–216, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1). Acesso em: 23 fev. 2018.

HONG, H.; JAAFARI, A.; ZENNER, E. K. Predicting spatial patterns of wildfire susceptibility in the Huichang County, China: An integrated model to analysis of landscape indicators. **Ecological**

Indicators, 2019; 101, p. 878–891. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.056>. Acesso em: 30 jul. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Programa de Queimadas. Monitoramento dos focos ativos por estado.** Disponível em: http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_estados/. Acesso em: 13 jun. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Programa de Queimadas. Monitoramento dos focos ativos por países.** Disponível em: http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_paises/. Acesso em: 13 jun. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manuais Técnicos em Geociências. Manual Técnico de Geomorfologia.** 2 ed., n. 5. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manuais Técnicos em Geociências. Manual Técnico da Vegetação Brasileira.** 2 ed., n. 1. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE - ICMBIO. **Manual para formação de brigadista de Prevenção e Combate a incêndios Florestais.** Brasília: ICMBIO, 2010.

INSTITUTO FEDERAL DE FLORESTAS - IEF. **Plano de manejo do Parque Estadual do Itacolomi – Encarte 1 – Diagnóstico do Parque.** 97 p. Belo Horizonte: Governo de Minas, 2007a.

INSTITUTO FEDERAL DE FLORESTAS - IEF. **Plano de manejo do Parque Estadual do Itacolomi – Encarte 2 – Planejamento e manual de gestão.** 139 p. Belo Horizonte: Governo de Minas, 2007b.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Relatório Diário Automático: 29/out/2017** – Programa Queimadas – Monitoramento por satélite.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Relatório Diário Automático: 09/fevereiro/2019** – Programa Queimadas – Monitoramento por satélite. Disponível em: <http://prodwww-queimadas.dgi.inpe.br/cadastro.novo/relatorios/relatorio-diario-automatico>. Acesso em: 09 de fev. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **GRÁFICOS – PROGRAMAS QUEIMADAS.** Disponível em: <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/#>. Acesso em: 14 jun. 2020.

JANEIRO, B. H. X. **Avaliação de microclima e risco de incêndios florestais: Estação Ecológica do Tripuí, período de inverno e primavera de 2018**. Dissertação (Grau em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

KAZMIERCZAK, M. L. Sensoriamento remoto para incêndios florestais. In: Sausen, Tania Maria; Lacruz María Silvia Pardi (org.). **Sensoriamento Remoto para Incêndios Florestais**. Ed. 1. Cubatão: Oficina de Textos, 2015, p. 175-212.

LAJAS, S. M. A. Integração de métodos estatísticos e determinísticos para a avaliação da suscetibilidade a deslizamentos superficiais. Dissertação (Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território) – Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. (Orgs.). **Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2010. 131 p. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16735>. Acesso em: 02 mar. 2020.

MARTINS, L. N.; BAPTISTA, G. M. DE M. Análise multitemporal do sequestro florestal de carbono no Projeto de Assentamento Carão, Acre. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 6, p. 1648-1657, 2015.

MEDEIROS, M. B.; FIEDLER, N. C. Incêndios florestais no Parque Nacional da Serra da Canastra: Desafios para a conservação da biodiversidade. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 157-168, 2003.

MINAS GERAIS. **Lei nº 4.495, de 14 de jun. de 1967**. Cria o Parque Estadual do Itacolomi, nos municípios de Ouro Preto e Mariana, em terrenos devolutos do Estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/images/stories/Itacolomi/lei4495.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2017.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Instrução Normativa nº 1, de 24 de agosto de 2012**. Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos Municípios, Estados e pelo Distrito Federal, e para o reconhecimento federal das situações de anormalidade decretadas pelos entes federativos e dá outras providências. Disponível em: http://www.editoramagister.com/doc_23667061_INSTRUCAO_NORMATIVA_N_1_DE_24_DE_AGOSTO_DE_2012.aspx. Acesso em: 5 dez. 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Rede brasileira de reservas da biosfera**. Brasília: MMA, 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Relatório Parabenizado – Unidade de Conservação: Parque Estadual do Itacolomi**. [2020]. Disponível em: <http://sistemas.mma.gov.br/portalcnuc/rel/index.php?fuseaction=portal.consultarFicha>. Acesso em: 13 mai. 2020.

NACIONAL WILDLAND/URBAN FIRE PROTECTION PROGRAM. **Provided Courtesy of Firewise Landscapes**. Disponível em: <http://www.firewise.net/wp-content/uploads/2012/05/wham.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2020.

NOURI H.; ANDERSON, S.; SUTTON, P.; BEECHAM, S.; NAGLER, P.; JARCHOW, C. J., ROBERTS, D. A. NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: Na assessment of vegetation in the Adelaide Parklands. **Science of the Total Environment**, v. 584-585, p. 11-18, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.130>. Acesso em: 5 dez. 2019.

NUNES, J. R. S.; FIER, I. S. N; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Desempenho da fórmula de Monte Alegre (FMA) e da fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) no Distrito Florestal de Monte Alegre. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 2, p. 319-326, 2010.

OLIVEIRA, C. I. P. **Susceptibilidade de incêndio florestal no concelho de Valongo. Implicações no Planeamento de Áreas Periurbanas**. Dissertação (Mestrado em Planeamento e Projeto do Ambiente Urbano) – Faculdade de Engenharia, Universidade Porto, Porto 2006.

PIEIDADE, A., ZÊZERE, J.L., GARCIA, R. & OLIVEIRA, S. Modelos de susceptibilidade a deslizamentos superficiais translacionais na Região a Norte de Lisboa. **Finisterra**, v. 46, n. 91, p. 9-26, 2011.

POURTAGHI, Z. S.; POURGHASEMI, H. R.; ROSSI, M. Forest fire susceptibility mapping in the Minudasht forests, Golestan province, Iran. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, p. 1515-1533; 2015. Disponível em: DOI 10.1007/s12665-014-3589-7. Acesso em: 20 de jul. de 2018.

REIS, E.; ZÊZERE, J. L.; VIEIRA, G. T.; RODRIGUES, M. L. Integração de dados espaciais em SIG para avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos. **Finisterra**, v. 38, n. 76, p. 3-34, 2003.

SAMPAIO, O. B. **Análise da eficiência de quatro índices na previsão de incêndios florestais para a região de Agudos – SP**. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 1999.

SILVA, L. M. L.; FILHO, W. P. B; FERREIRA, W. R.; KOKSHENEV, I.; PARREIRAS, R O.; EKEL, P. Y. Alternativas locacionais para a geração renovável em Minas Gerais: uma discussão baseada na abordagem multicritério espacial. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 2, p. 100-108, 2017.

SILVEIRA, H. L. F.; VETTORAZZI, C. A; VALENTE, R. O. A. Avaliação multicriterial no mapeamento de risco de incêndios Florestais, em ambiente SIG, na Bacia do Rio Corumbata. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 259-268, 2008.

SOUSA, G. M. **Modelagem do conhecimento aplicada ao Estudo da susceptibilidade à ocorrência de Incêndios no Parque Nacional do Itatiaia**. Dissertação (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SOUSA, G. M; COURA, COURA, P. H. F.; FERNANDES, M. DO C.; MENEZES, P. M. L. **Mapeamento geocológico da potencialidade à ocorrência de incêndios no maciço da Pedra Branca/RJ**. In: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto; 25-30 abr. 2009; Natal, Brasil. Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE; p. 4433-4440.

TOMZHINSKI, G. W. **Análise geocológica dos incêndios florestais no Parque Nacional do Itatiaia**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

TORRES, F. T. P.; LIMA, G. S.; COSTA, A. G.; FÉLIX, G. A.; JÚNIOR, M. R. DA S. Perfil dos incêndios florestais em Unidades de Conservação brasileiras no período de 2008 a 2012. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 46, n. 4, p. 531 - 542, 2016. Disponível em: DOI: 10.5380/rf.v46i3.44199. Acesso em: 30 jul. 2018.

TORRES, F. T. P.; ROQUE, M. P. B.; LIMA, G. S.; MARTINS, S. V.; FARIA, A. L. L. Mapeamento o risco de incêndios florestais utilizando técnicas de geoprocessamento. **Floresta e Ambiente**, Viçosa, v. 24, p. 1-10, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.025615>. Acesso em: 12 dez. 2019.

VASCONCELOS, A. F. C. G. N. **Avaliação da suscetibilidade à ocorrência de incêndios florestais no concelho de Leiria**. Dissertação (Mestrado em SIG e Modelação Territorial

Aplicados Ao Ordenamento) – Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa. Lisboa, 2013.

YAN, T Z (1988) Recent advances of quantitative prognoses of landslide in China. In: Bonnard C (ed.) *Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, Lausanne, 2, Balkema, Rotterdam: 1263-1268.

YIN, K. L; YAN, T. Z. (1988) Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In: Bonnard C. **Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides**, 2, Balkema, Rotterdam: 1269-1272.

ZÊZERE, J. L. Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). **Natural Hazards & Earth System Sciences**, v. 2, p. 73-82, 2002. Disponível em: <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/2/73/2002/nhess-2-73-2002.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2018.

ZÊZERE, J. L. Predição probabilística de movimentos de vertente na escala regional. **Jornades sobre terrasses i prevenció de riscos naturals**, Mallorca, p. 17-30, 2006.

ZÊZERE, J.L., GARCIA, R.A.C., OLIVEIRA, S.C. & REIS, E. (2005). Análise sensitiva na avaliação da susceptibilidade a deslizamentos na região a norte de Lisboa. X Colóquio Ibérico de Geografia, APG, Évora, PT. Disponível em: http://www.apgeo.pt/files/docs/CD_X_Coloquio_Iberico_Geografia/pdfs/075.pdf. Acessado em janeiro de 2020.