

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

**ANÁLISE ESPACIAL DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS NAS
ENCOSTAS DA BACIA DO CÓRREGO D'ANTAS, NOVA FRIBURGO - RJ**



Leticia Bolsas Mendonça

Rio de Janeiro

2021



ANÁLISE ESPACIAL DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS NAS ENCOSTAS DA BACIA DO CÓRREGO D'ANTAS, NOVA FRIBURGO - RJ

Letícia Bolsas Mendonça

Monografia apresentada ao Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Geografia.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Luiza Coelho Netto

Coorientadora: Msc. Ana Carolina Facadio Campello

Rio de Janeiro

2021

CIP - Catalogação na Publicação

MM539a Mendonça, Leticia Bolsas
Análise Espacial da Suscetibilidade à Ocorrência
de Incêndios nas Encostas da Bacia do Córrego
d'Antas, Nova Friburgo - RJ / Leticia Bolsas Mendonça.
-- Rio de Janeiro, 2021.
50 f.

Orientadora: Ana Luiza Coelho Netto.
Coorientadora: Ana Carolina Facadio Campello.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto
de Geociências, Bacharel em Geografia, 2021.

1. Fogo. 2. Geoprocessamento. 3. Análise
Geoecológica. 4. Degradação da Vegetação. I. Coelho
Netto, Ana Luiza, orient. II. Campello, Ana
Carolina Facadio, coorient. III. Título.

Ao meu avô Alci Bolsas que sempre me mostrou, desde criancinha,
como somos felizes quando fazemos o que amamos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha mãe por todo apoio e amor. Obrigada por tudo que me ensinou, seja através das nossas conversas ou simplesmente através de suas atitudes que sempre me inspiraram a ser quem eu sou. Obrigada por sempre acreditar em mim, me fornecendo sempre todas as condições possíveis para alcançar minhas conquistas.

Agradeço a minha orientadora de ideias, Ana Luiza Coelho Netto, por todos os ensinamentos passados e por me estimular a pensar cientificamente. Obrigada por proporcionar um ambiente de cooperação, amizade e estimulação no Geoheco, sendo muito importante na minha formação acadêmica e pessoal.

Agradeço a minha coorientadora Ana Carolina Facadio Campello, pelos ensinamentos, por compartilhar o entusiasmo de um artigo científico incrível, pela paciência com minhas mensagens de madrugada e pela parceria.

Agradeço a todos os membros do Geoheco, Ilgner, Max, Joana, Karine, Roberta, Flávio, Tomás, Mayume, Léo, Vânia, Aydam, Isadora e Guilherme pela parceria nos trabalhos de campo, por compartilhar ideias, pelas risadas, perrengues e principalmente pela ajuda sempre solícita nas diversas vezes em que precisei. Obrigada também ao Maguinho por nos conduzir para o trabalho de campo, solução incrível de problemas inesperados e risadas. Tenho muito orgulho de fazer parte do Geoheco e ter todos vocês como parceiros nessa caminhada.

Agradeço ao Allan por todo amor, por acreditar em mim, pela paciência e por todo companheirismo. Obrigada por me apoiar em todos os momentos e por me fazer ser uma pessoa melhor.

Agradeço as minhas amigas pra toda vida, Dhébora, Aline, Tainá e Thayane por sempre estarem presentes e compartilharem a vida comigo.

Agradeço à toda minha família, ao João Paulo por todo amor, dedicação e paciência desde quando me conheceu aos 7 anos; aos meus irmãos pelos momentos, risadas, brigas e amor; aos meus avós por toda inspiração que vocês me proporcionaram, mesmo percebendo mais tarde, e por todo carinho e amor. Agradeço também o meu pai, por me fornecer condições para chegar aonde eu cheguei.

Agradeço também a todos os professores e funcionários da UFRJ que contribuíram para minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço ao CNPq e ao INCT-Reageo pela bolsa de iniciação científica durante minha graduação.

RESUMO

Registros paleoambientais indicam a recorrência de incêndios no período geológico recente na Mata Atlântica, no qual alguns autores relacionam essa evidência à ação antrópica desde o Pleistoceno até o Holoceno médio, indicando que o bioma já havia presenciado alterações na vegetação há pelo menos 11,7 mil anos. No entanto, com a intensificação do uso do fogo para técnicas agrícolas e manejo da vegetação, a degradação da vegetação cresceu exponencialmente a partir de 1.500 com a chegada dos imigrantes europeus. Em Nova Friburgo, esse cenário não é diferente, no qual estudos mais recentes revelam que os incêndios são fenômenos recorrentes no município, ocorrendo cerca de 1.500 incêndios entre 2014 e 2017, com 400 incêndios nos meses mais secos. Nesse contexto, este estudo busca classificar e espacializar a suscetibilidade do terreno em relação a detonação e propagação de incêndios na bacia do Córrego d'Antas, em Nova Friburgo. Para isso, foi utilizado um método de ponderação, na qual as classes das variáveis eram potencializadas pelos pesos dos mapas, conforme a relevância da variável. As variáveis/indicadores selecionados foram: vegetação e uso do solo, índice de posicionamento topográfico, orientação das encostas, forma geométrica das vertentes e proximidade de áreas urbanas e vias. Por fim foram construídas cartas de potencial de propagação e potencial de detonação, as quais foram cruzadas para elaborar a carta final da suscetibilidade aos incêndios da bacia do Córrego d'Antas. A carta do potencial de propagação demonstrou que 40% da bacia é classificada como alto potencial de propagação, sendo que 85% da área queimada mapeada ocorreu nessa classe. A maioria dos incêndios ocorrem em até 50 m das estradas e 150 m das áreas urbanas (75% e 88% respectivamente). A carta final da suscetibilidade demonstrou que 45% da área da bacia está classificada como alta suscetibilidade e que 76% da área queimada ocorreu nessa classe.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	10
2.1 GERAL	10
2.2 ESPECÍFICOS	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 CONCEITOS AFINS AO ESTUDO DO FOGO.....	11
3.2.1 Fontes de Ignição	11
3.2.2 Comportamento do Fogo	13
3.2 MAPEAMENTO GEOECOLÓGICO DA SUSCETIBILIDADE AO INCÊNDIO.....	19
4 ÁREA DE ESTUDO	22
5 MATERIAIS E MÉTODOS	24
5.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS E ATRIBUIÇÃO DE PESOS PARA AS CLASSES DOS MAPAS	24
5.1.1 Vegetação e Uso do Solo	24
5.1.2 Índice de Posicionamento Topográfico	26
5.1.3 Orientação das Encostas	27
5.1.4 Forma Geométrica das Vertentes	27
5.1.5 Declividade	28
5.1.6 Potencial de Detonação	28
5.2 VALIDAÇÃO DA CARTA DE SUSCETIBILIDADE AO INCÊNDIO	29
5.3 DEFINIÇÃO DOS PESOS DOS MAPAS DAS VARIÁVEIS	29
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6.1 VEGETAÇÃO E USO DO SOLO.....	31
6.2 ÍNDICE DE POSIACIONAMENTO TOPOGRÁFICO.....	33
6.4 FORMA GEOMÉTRICA DAS VERTENTES	37

6.5 DECLIVIDADE.....	38
6.6 POTENCIAL DE PROPAGAÇÃO	39
6.7 POTENCIAL DE DETONAÇÃO	42
6.8 CARTA DE SUSCETIBILIDADE AO INCÊNDIO.....	44
7 CONCLUSÕES.....	46
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A reconstituição histórica das ocorrências de fogo no domínio da Mata Atlântica, vistos através dos vestígios de carvão vegetal nos depósitos de encostas e/ou fluviais, indica a recorrência de incêndios no período geológico recente. Alguns autores relacionam essas evidências a ocorrência de fogo antrópico no bioma, desde o final do Pleistoceno até o Holoceno médio (JESKE-PIERUSCHKA e LEDRU, 2016). Desse modo, a Mata Atlântica já havia vivenciado alterações antropogênicas antes da chegada dos europeus. Dean (1996) ressalta que essas alterações na floresta tiveram início com os caçadores-coletores e em seguida, com as práticas agrícolas itinerantes dos povos indígenas, que realizavam queimadas controladas em pequenas áreas da floresta, distantes entre si, e pousio, permitindo a regeneração da vegetação.

Após 1500, a Mata Atlântica presenciou ciclos de degradação intensivos associados à sucessivas práticas extrativistas e agrícolas, como a extração do Pau-Brasil, a produção de cana-de-açúcar, o plantio do café; a partir do século XX a explosão demográfica alterou expressivamente a cobertura vegetal (DEAN, 1996). Essas práticas reduziram a Mata Atlântica à pequenos fragmentos florestais, muitas vezes isolados entre si, o que dificulta a conectividade entre eles, restringindo a expansão desses fragmentos e acentuando a regressão natural da floresta. Atualmente, os fragmentos florestais remanescentes representam apenas entre 11% a 16% da área originalmente coberta pela Floresta Atlântica (JESKE-PIERUSCHKA e LEDRU, 2016), sendo que, 80% desses fragmentos florestais são menores do que 0,5 km² (RIBEIRO et al., 2011). Frente ao histórico do uso do fogo no Bioma da Mata Atlântica, Cochrane (2003) destaca que a degradação florestal não está associada apenas com a introdução do fogo nesse ecossistema, mas, sobretudo com a frequência em que a vegetação é submetida aos incêndios.

Em Nova Friburgo, na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, a intensa remoção da cobertura florestal teve início no século XIX, com os imigrantes europeus utilizando o fogo como técnica agrícola e instrumento de manejo das matas (ARAÚJO & MAYER, 2003 apud MATA, 2006). Estudos mais recentes revelam que os incêndios são fenômenos recorrentes nesse município, sendo levantados 1.427 atendimentos ao combate de incêndios florestais entre 2014 e 2017 pelo 6º Grupamento de Bombeiros Militar (MENDONÇA *et al.* 2019). Esses autores propõem que a origem dessas ignições é em grande parte induzida pelo homem, uma vez que a maioria dos focos registrados nesse período ocorreram em áreas urbanas. A frequência desse fenômeno no município indica que os incêndios são um dos principais agentes de degradação da vegetação.

Nesse contexto, a análise e compreensão das principais variáveis que favorecem a ocorrência dos incêndios é de suma importância para subsidiar o planejamento e o processo de gestão territorial e ambiental, contribuindo para a prevenção e combate desse fenômeno de degradação do meio ambiente urbano e rural.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Classificar e espacializar a suscetibilidade do terreno em relação a detonação e propagação de incêndios, nas encostas da bacia do Córrego D'Antas (53 km²), escala 1:5.000, como subsídio ao estudo da interação vegetação-solo-água na regulação dos movimentos de massa do tipo translacional raso.

2.2 ESPECÍFICOS

- a) Selecionar as variáveis/indicadores afins aos fatores (vegetação; geomorfologia, climático; interferência humana) considerados relevantes à detonação e propagação do fogo sobre as encostas;
- b) Integrar os resultados obtidos no item acima indicado, para elaboração da carta de suscetibilidade aos incêndios.
- c) Validar a carta de suscetibilidade aos incêndios.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCEITOS AFINS AO ESTUDO DO FOGO

O fogo é uma reação química, denominada combustão, entre um combustível e um comburente, geralmente o oxigênio, que resulta em liberação de energia na forma de calor. Os princípios da combustão são ilustrados pelo “triângulo do fogo” na Figura 1, descrito por Byram (1959) como a conexão fundamental na reação em cadeia da combustão. Desse modo, na ausência de qualquer um desses elementos, a combustão não pode acontecer.

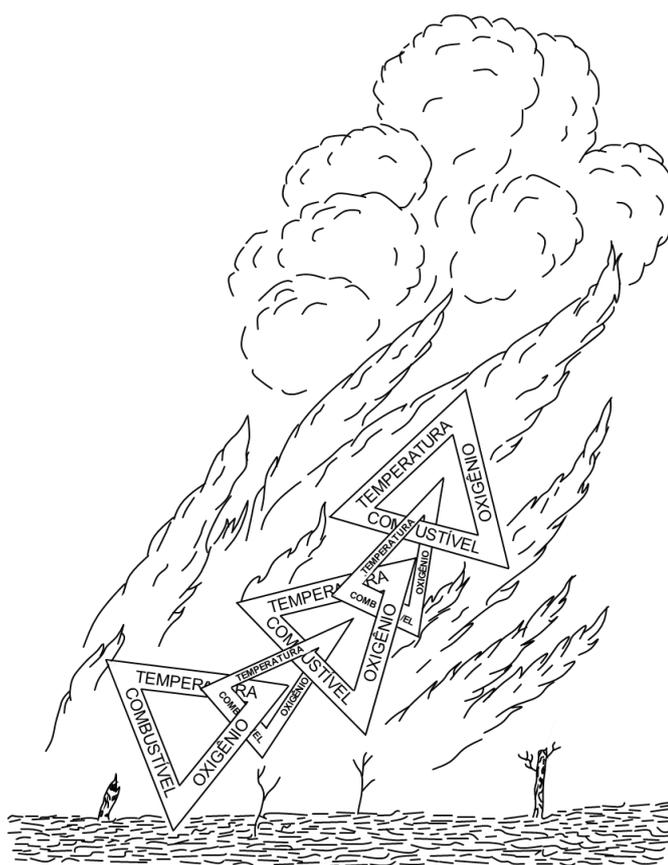


Figura 1. Triângulo do fogo. Fonte: Adaptado de Byram (1959)

3.2.1 Fontes de Ignição

Para que a combustão aconteça é necessário que o combustível seja aquecido até a temperatura do seu ponto de ignição. Ganteaume e Syphard (2018) elaboraram um esquema que classifica as fontes de ignição em 6 grandes grupos de acordo com agente de ignição e o grau de intencionalidade de provocar um incêndio (Figura 2). Os autores ressaltam que a

natureza de fontes de ignição pode apresentar um padrão sazonal ao longo do ano devido às condições climáticas e práticas agrícolas.

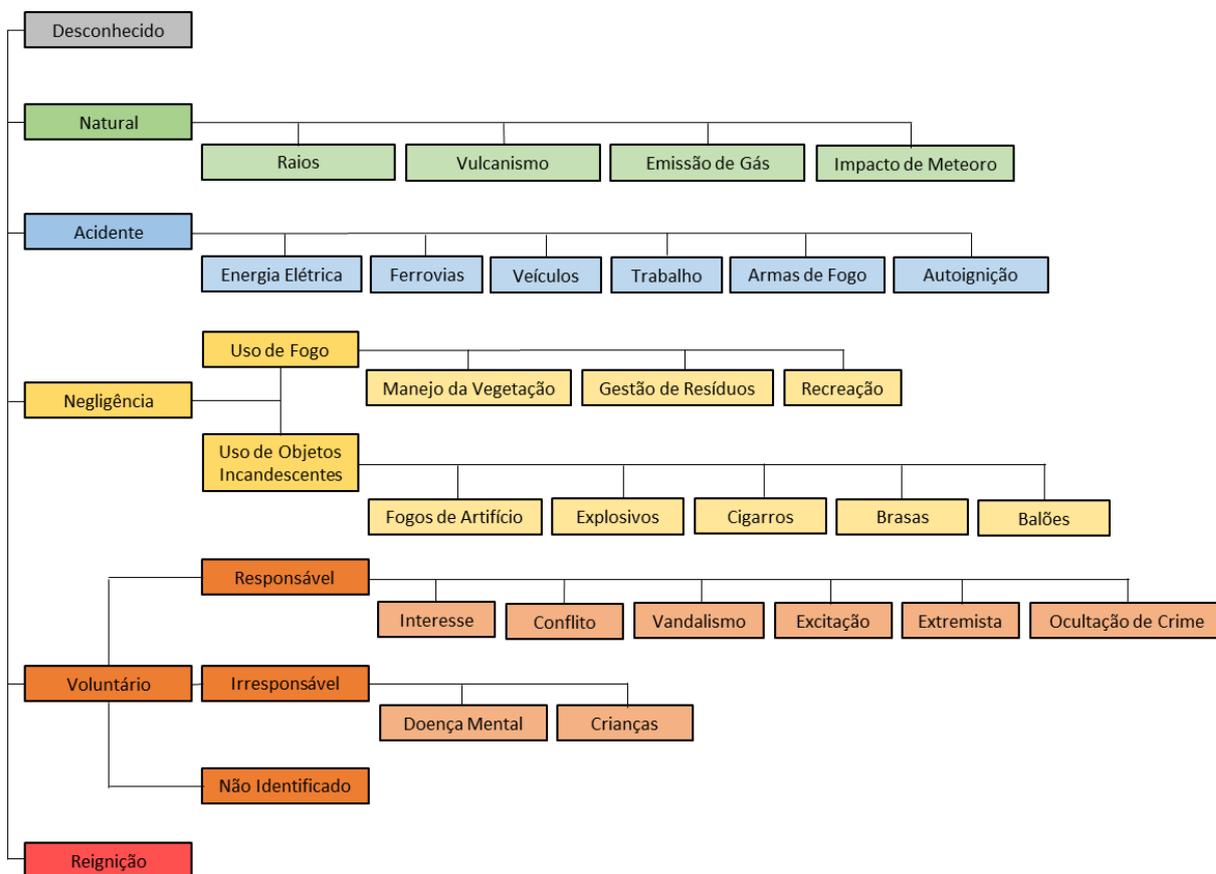


Figura 2. Fontes de Ignição. Fonte: Adaptado de Ganteaume e Syphard (2018).

As fontes de ignição natural são aquelas em que não há qualquer tipo de intervenção humana, isto é, incêndios que foram originados por raios, atividade vulcânica, emissão de gás natural em turfeira e impacto de meteoro. Dentre esses, os raios apresentam uma maior importância por serem mais frequentes, principalmente em regiões tropicais, pois favorecem a formação de condições propícias para a ocorrência do fenômeno.

No Brasil, há a incidência de cerca de 77,8 milhões de raios por ano segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Ramos-Neto e Pivello (2000) argumentam que provavelmente a ausência de registro de incêndios causados por raios no cerrado promovem a crença de que esses fenômenos são raros. Nesse trabalho, realizado no Parque Nacional das Emas situado no Estado de Goiás, os autores observaram que dentre 45 focos de incêndios registrados entre 1995 e 1999, 40 foram iniciados por raios. No entanto, a maioria dos raios que atingem as árvores não são capazes de provocar incêndio, apenas causam danos mecânico, visto

que o tempo de duração da corrente de retorno não é suficiente para aumentar a temperatura do combustível e promover a ignição (LATHAM & WILLIAMS, 2001).

Além disso, alguns combustíveis são capazes de aquecer e atingir o ponto de ignição sem nenhuma fonte de calor externa, através de reações químicas como a oxidação e decomposição exotérmica; por exemplo, o lento processo de oxidação do óleo de linhaça e a decomposição térmica da madeira podem resultar em uma reação de combustão (BYRAM, 1959). Nesses casos, quando um combustível tem a capacidade de autoignição, os incêndios que resultam desse processo são comumente referidos como incêndios de *combustão espontânea*.

3.2.2 Comportamento do Fogo

O termo comportamento do fogo foi descrito por Byram (1959) e exprime “o que o fogo faz”, ou seja, consiste nas características da frente de chamas como intensidade, velocidade e direção de propagação, dimensões da chama (altura, comprimento e largura) e duração. A intensidade do fogo é definida pelo autor como a taxa de energia liberada por unidade de tempo e por unidade de comprimento da frente da chama. O comportamento do fogo resulta das interações entre as propriedades do combustível, as condições meteorológicas e as características do relevo.

3.2.2.1 Propriedades do Combustível

As propriedades do combustível que possuem maior influência no comportamento do fogo são tipo, arranjo, tamanho, continuidade e umidade. (Fernandes e Rego 2010). Byram (1959) conceitua combustível disponível como a quantidade de combustível que é consumido em um incêndio, determinado, principalmente pelas condições de umidade do material.

Conforme o autor, a probabilidade de ignição em combustíveis que possuem umidade em torno de 25 a 30% é praticamente zero, e o teor de umidade em combustíveis mortos possui uma variabilidade maior do que em combustíveis vivos, entre 2% a 200% e entre 75% a 150%. Contudo, Schroeder e Buck (1970) apontam uma variabilidade de 35% a 200% no teor de umidade para combustíveis vivos e 1,5% a 30% em combustíveis mortos.

De acordo com Byram (1959) o efeito mais importante que a umidade do combustível causa na combustão é descrito como *smothering process*, no qual o vapor d'água oriundo do

combustível dispersa o oxigênio próximo ao material em combustão. Nesse sentido, se a pressão do vapor d'água por si só for relativamente igual a pressão atmosférica, a maioria do oxigênio, assim como outros gases, serão afastados do espaço imediatamente adjacente ao combustível. Desse modo, a combustão não pode acontecer até que tenha evaporado água o suficiente do combustível para que diminua a pressão do vapor d'água ao ponto em que a pressão do oxigênio seja alta o suficiente para suportar a combustão e, portanto, quanto mais úmido for o combustível, maior será a fase de pré-aquecimento, mais lenta será sua combustão e conseqüentemente menor a velocidade de propagação.

Byram (1959) explica a relação entre o tamanho do combustível e a velocidade da combustão através dos mecanismos de transferência de calor. Em combustíveis grandes, o processo de condução térmica é o mecanismo dominante, pois é o único que consegue transferir o calor da superfície para o interior do combustível. Nesse sentido, como a condução é o processo de transferência de calor mais lento entre os três mecanismos (condução, radiação e convecção), a velocidade de combustão em combustíveis grandes é demorada. Por outro lado, em combustíveis pequenos, a velocidade de combustão é maior devido a maior superfície de contato, que possibilita a transferência de calor pelos mecanismos de radiação e convecção que, por sua vez, são mais rápidos.

Nesse sentido, o combustível consumido também depende do arranjo do mesmo, como ressaltam McArthur e Cheney (1966), pois diferentes classes de tamanho são mais ou menos inflamáveis. Os autores conduziram incêndios experimentais em dias sucessivos (1, 2, 14 e 30 dias) após chuva forte em um conjunto de combustível de *Pinus radiata* que está em progresso de perda de umidade. Em condições muito úmidas, no primeiro e segundo dia após a chuva, apenas as acículas e pequenos ramos (< 0,62 cm de diâmetro) do pinheiro entram em combustão, aproximadamente 16% do combustível é consumido. Após 14 dias, ramos maiores (0,63 e 2,54 cm), galhos (2,55 a 7,62 cm) e a camada O₂ do solo estão secos o suficiente para entrar em combustão, 55% do total de combustível é consumido. Em condições muito secas, 30 dias após a chuva, 80,6% do total de combustível é consumido, com exceção de galhos muito grandes (> 7,6 cm) e camadas inferiores do solo. Dessa forma, um combustível heterogêneo possui um gradiente de umidade após uma chuva recente, que controla a ordem de combustão das diferentes classes de tamanho e a quantidade de combustível disponível para queimas.

Além disso, a propagação do fogo também depende da distribuição espacial do combustível. Rossi et al. (2020) explica que se o combustível não for contínuo no terreno, a

largura da frente de incêndio não será constante ao longo do perímetro da frente de incêndio, limitando a taxa de propagação do fogo).

O estudo de Dias (2011) na encosta norte do maciço da Tijuca, sujeita a fogo recorrente, ressalta a importância de considerar a inflamabilidade das gramíneas na degradação de fragmentos florestais adjacentes, visto que favorecem a propagação das chamas devido a elevada quantidade de combustível fino, acumulação de biomassa morta e composição de um dossel homogêneo. Dessa forma, as gramíneas invadem os fragmentos através da borda florestal devido a rarefação do dossel, promovendo uma maior inflamabilidade nessa área e configurando um mecanismo de retroalimentação positiva, originando ciclos de degradação.

3.2.2.2 Condições Meteorológicas

A precipitação afeta as condições de umidade do material combustível, controlando, portanto, na probabilidade de ignição do material. O estudo de Mendonça *et al.* (2019) no município de Nova Friburgo demonstra o padrão do comportamento da frequência dos incêndios junto ao regime de chuva mensal, destacando que a maior frequência de incêndios ocorreu nos meses com pluviosidade mensal abaixo de 100 mm (Figura 3 e 4).

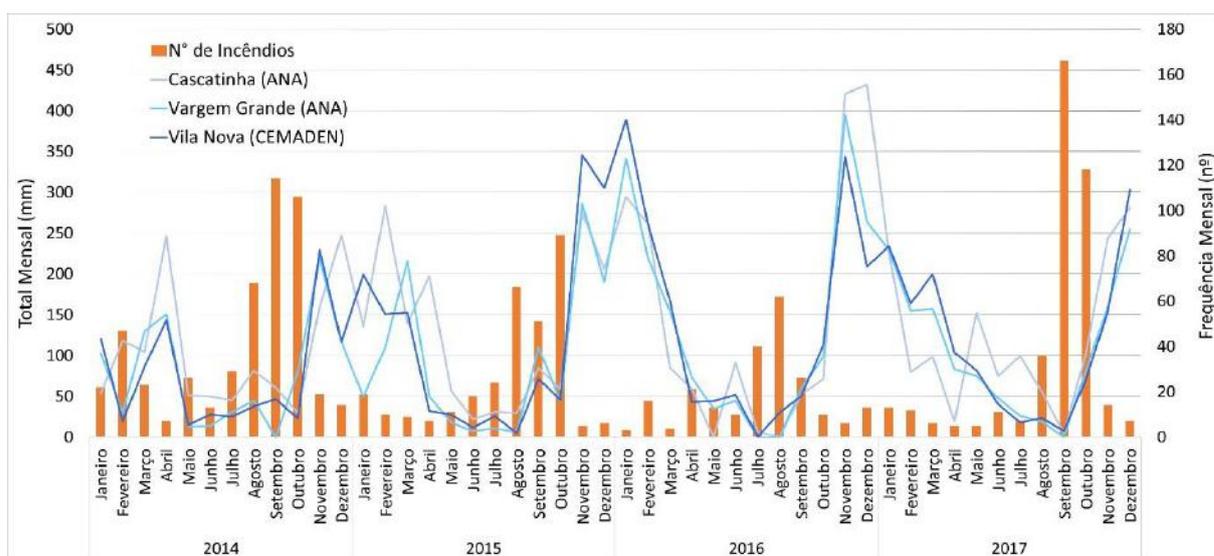


Figura 3. Histograma de frequência de incêndios e distribuição da chuva mensal em 3 estações pluviométricas em Nova Friburgo no período de 2014 a 2017. Fonte: Mendonça *et al.* (2019).

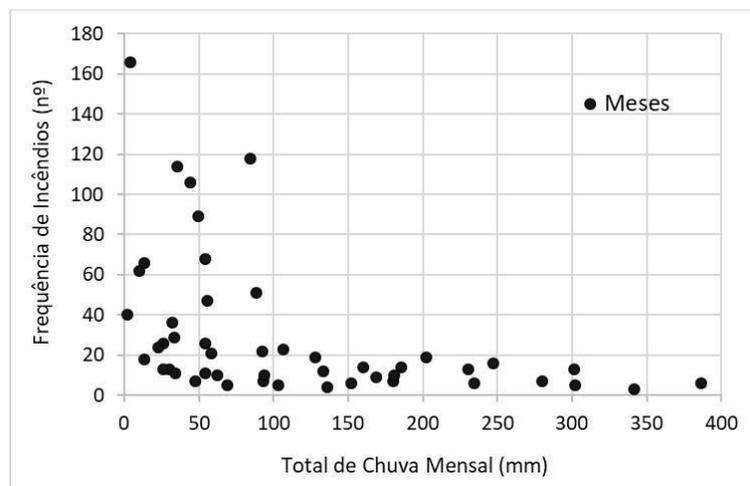


Figura 4. Correlação entre a chuva acumulada mensal e a frequência de incêndios entre 2014 e 2017. Fonte: Mendonça *et al.* (2019).

Outro fator importante que têm influência no comportamento do fogo é o vento. Além de fornecer oxigênio para o prolongamento e/ou incremento do processo de combustão, o vento pode aumentar a velocidade de propagação do fogo devido a inclinação da chama e carregar pequenas partes de combustível em chamas, causando novas ignições em áreas não queimadas (BYRAM, 1959). Em Nova Friburgo, os ventos predominantes vêm de Norte durante os meses de maio a agosto e novembro a março e vêm de Leste durante os meses de março a maio e agosto a novembro (Figura 5).

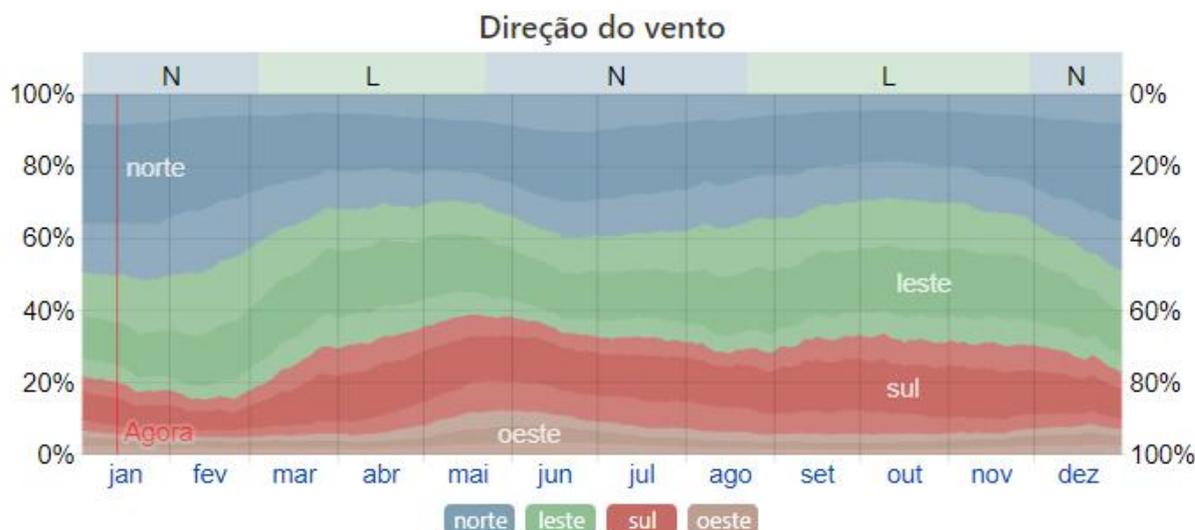


Figura 5. Direção média horária do vento em Nova Friburgo durante o ano. Fonte: WeatherSpark. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/30655/Clima-caracter%3%ADstico-em-Nova-Friburgo-Brasil-durante-o-ano#Sections-Sources>>. Acesso em: 13/01/2021.

3.2.2.3 Características do Relevo

A forma do relevo é capaz de controlar a umidade dos combustíveis e portanto, na detonação e propagação do fogo, uma vez que atua como componente determinante para convergência ou divergência de fluxos nas encostas. O relevo pode ser classificado a partir de sua curvatura vertical, pela análise de formas côncavas, convexas e retilíneas no perfil topográfico; e a partir de sua curvatura horizontal, pela variação da orientação das vertentes ao longo de uma curva de nível, caracterizando formas convergentes, divergentes e planares (Figura 6).

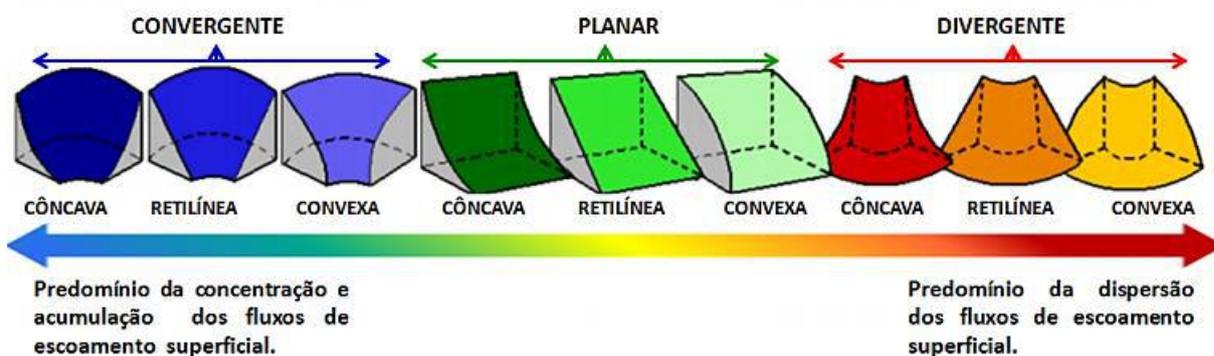


Figura 6. Formas das vertentes. Fonte: Neto (2013)

A declividade tem papel fundamental na propagação das chamas, quanto maior a declividade, mais rápido o fogo se propaga devido à transferência de calor por radiação e convecção, como explicado anteriormente. O estudo de Silvani *et al.* (2012) simulando um relevo plano e encostas de 20° e 30° em parcelas experimentais em ambiente controlado, sem influência do vento, verificaram que conforme a declividade aumenta, a frente da chama deixa de ter uma “forma em U” para assumir uma “forma em V” (Figura 7). Nesse estudo, o fogo propagado sem declive apresentou uma taxa de propagação de até 13,8 mm/s, enquanto que propagado com declive de 20° e 30° apresentaram uma velocidade de até 46,4 mm/s e de até 100,3 mm/s, respectivamente. Além disso, a altura da chama também aumentou conforme o ângulo de declive, exibindo até 0,63 metros em relevo plano, até 0,91 metros para declive de 20° e até 1,03 metros para declive de 30°.



Figura 7. Padrão de propagação da frente da chama a) em relevo plano, b) em encosta com 20° de declive e c) em encosta com 30° de declive. Fonte: Adaptado de Silvani *et al.* (2012).

A orientação das encostas controla, em parte, as condições de umidade do relevo em razão da quantidade de radiação solar recebida para as diferentes exposições. O estudo de Oliveira *et al.*, (1995) no Maciço da Tijuca, no Estado do Rio de Janeiro, ressalta que as encostas voltadas para Norte recebem os primeiros e os últimos raios solares, resultando em uma maior e mais rápida perda de umidade florestal e, conseqüentemente, numa maior suscetibilidade a ocorrência de incêndios. Esses autores constataram que a diferença média máxima de temperatura entre as encostas foi de 3,6°C, e que as encostas voltadas para Norte perdem 50% da umidade inicial da serrapilheira em 1,9 dias contra 3,1 nas encostas voltadas para Sul.

Por fim, a altitude tem influência nas condições meteorológicas, condicionando a temperatura, o vento e a precipitação. Associada com a forma do relevo, também pode canalizar os ventos, promovendo uma maior velocidade na propagação do fogo.

3.2 MAPEAMENTO GEOECOLÓGICO DA SUSCETIBILIDADE AO INCÊNDIO

Os estudos de Carl Troll em 1939 sobre a produção de paisagens e questões relacionadas ao uso da terra, resultaram na origem da Geoecologia (ou Ecologia da Paisagem), unificando os conceitos da Geografia em relação à paisagem e da Ecologia em relação à distribuição e abundância dos organismos (BEGON et al., 2007; SIQUEIRA et al., 2013). Nesse sentido, a análise geoecológica tem um caráter integrativo e dinâmico, no qual, segundo Bertrand (1972), a paisagem, não é resultado apenas da soma de elementos geográficos, mas da combinação da dinâmica temporal e espacial dos elementos físicos, biológicos e antrópicos. Conforme Naveh e Lieberman (1984), Troll tinha como objetivo integrar a abordagem horizontal do geógrafo com a abordagem vertical do ecólogo.

Esse é o contexto que fundamenta o mapeamento geoecológico, constituindo uma análise integrada do arranjo espacial e funcional das variáveis a serem estudadas, baseada no arcabouço teórico e empírico. Nesse sentido, Bridgewater (1993) ressalta que a utilização do sistema de informação geográfica (SIG) é de grande valia para o estudo e planejamento de processos ecológicos.

A suscetibilidade é compreendida como a predisposição do terreno à ocorrência de um determinado fenômeno, se referindo às características intrínsecas da área. Nesse sentido, a avaliação da suscetibilidade consiste na identificação e classificação dessas áreas através de uma análise qualitativa dos fatores que contribuem para a ocorrência do perigo (JULIÃO *et al.*, 2009); para os incêndios, os fatores que controlam a propagação do fogo são as propriedades do combustível, as condições climáticas e as características topográficas; e os fatores que controlam a detonação são as fontes de ignição. Desse modo, a análise desses dois grupos possibilita avaliar a suscetibilidade do fogo em uma região, ou seja, permite estabelecer aonde e como o fogo vai se propagar (BATISTA, 2000).

Diversos têm sido os parâmetros utilizados pela literatura para avaliar a suscetibilidade à ocorrência de incêndios (Tabela 1). Entretanto, é importante ressaltar que não existe variáveis melhores que outras, pois cada uma deve ser analisada de acordo com as características da área de estudo. A maioria dos autores inserem as variáveis da detonação (ou ignição) com as variáveis da propagação, mas neste trabalho entendemos que esses elementos não possuem a mesma natureza, analisando os dois grupos separadamente, assim como Silva *et al.* (2009) e Sousa *et al.* (2009), para elaborar a carta de suscetibilidade.

Tabela 1. Variáveis para o mapeamento geocológico da suscetibilidade a ocorrência de incêndios em alguns estudos. O nome de algumas variáveis foi alterado em relação ao original para melhor visualização dos dados.

Local	Área (Km²)	Variáveis	Fonte
Grande Vitória (ES)	~1290,0	Vegetação e Uso do Solo Declividade Orientação das Encostas Altitude Detonação	Dalcumune e Santos (2005)
Maciço da Pedra Branca (RJ)	124,9	Vegetação e Uso do Solo Forma das Vertentes Radiação Solar Detonação	Sousa <i>et al.</i> (2009)
Parque Nacional do Itatiaia (RJ)	579,2	Vegetação e Uso do Solo Orientação das Encostas Forma das Vertentes Detonação	Silva <i>et al.</i> (2009)
Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros	2376,7	Vegetação e Uso do Solo Declividade Altitude Orientação das Encostas Precipitação Temperatura Evapotranspiração Deficiência Hídrica Detonação	Prudente (2010)
Estado do Rio de Janeiro	43 780,2	Vegetação e Uso do Solo Forma das Vertentes Radiação Solar Precipitação	Fernandes <i>et al.</i> (2011)
Parque Nacional do Itatiaia (RJ)	579,2	Vegetação e Uso do Solo Forma das Vertentes Declividade Altitude	Tomzhinski (2012)

		Radiação Solar Precipitação	
Novo Mundo (MT)	5.794,7	Vegetação e Uso do Solo Declividade Detonação	Ribeiro <i>et al.</i> , (2012)
Área urbana de Ubá (MG)	407,5	Vegetação e Uso do Solo Declividade Orientação das Encostas	Torres <i>et al.</i> , (2014)
Petrópolis (RJ)	795,8	Vegetação e Uso do Solo Declividade Altitude Orientação das Encostas Precipitação Temperatura	Camargo <i>et al.</i> (2019)
Parque Estadual da Serra da Concórdia (RJ)	8,04	Vegetação e Uso do Solo Forma das Vertentes Orientação das Encostas Radiação Solar	Andrade e Ferreira (2019)
Parque Estadual Lapa Grande (MG)	376,28	Vegetação e Uso do Solo Forma das Vertentes Declividade Altitude Orientação das Encostas Radiação Solar	Santos Júnior <i>et al.</i> (2020)

4 ÁREA DE ESTUDO

A Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro está situada na Serra do Mar, sistema de cadeia montanhosa que abrange desde o litoral norte do Estado de São Paulo, denominada localmente de Serra da Bocaina, até a Serra do Desengano no Norte Fluminense. As escarpas serranas apresentam clima úmido, registrando totais pluviométricos anuais que ultrapassam 2.000 mm/ano, em razão do efeito orográfico provocado pela Serra do Mar que impede a passagem dos sistemas frontais (DANTAS *et al.*, 2000). Nesse contexto, o município de Nova Friburgo é qualificado como a cidade com um dos maiores índices pluviométricos registrados para o estado do Rio de Janeiro, exibindo uma precipitação média anual de em torno de 2.500 mm nas áreas mais elevadas, e período mais chuvoso compreendido entre dezembro e fevereiro quando a média mensal da chuva varia entre 240 a 340 mm nas maiores altitudes (COELHO NETTO *et al.*, 2013).

A bacia hidrográfica do Córrego d'Antas (53 km²), situada em Nova Friburgo compõe um dos principais afluentes do Rio Bengalas, no centro urbano do município (Figura 8). O tipo de vegetação original da região é a Floresta Ombrófila Densa Montana. No mapeamento na escala 1:50.000, que abrange os municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo, Coutinho (2015) ressaltam que 55,5 % da cobertura vegetal é composta por florestas. Contudo, em mapeamento mais detalhado realizado na escala de 1:5.000 na bacia do Córrego d'Antas, o mesmo autor identificou 25,3% da área como floresta degradada e apenas 5,8 % como floresta em estágio sucessional avançado.

Na bacia do Roncador (23 km²), adjacente à bacia do córrego d'Antas, Fraga *et al.* (2015) estudou dois fragmentos florestais de idade em torno de 20 e 50 anos com elevado número de indivíduos jovens (até 15cm de DAP: 97,4 % e 79,5 % respectivamente) e elevado número de indivíduos arbóreos mortos (12,9% e 8,3 %) se comparado a um fragmento florestal de 50 anos em Ilha Grande. Os autores ressaltam que o processo sucessional mais lento do fragmento quando comparado a outros estudos como na Ilha Grande no sul do Estado (RJ) sob uso tradicional caçara, evidenciando uma coevolução dessas populações com a floresta (OLIVEIRA, 1999). O processo de sucessão mais lento evidenciado na Região Serrana pode ser um retrato do uso intensivo do fogo no passado e que ainda se faz no presente, como sugerem Fraga *et al.* (2015).

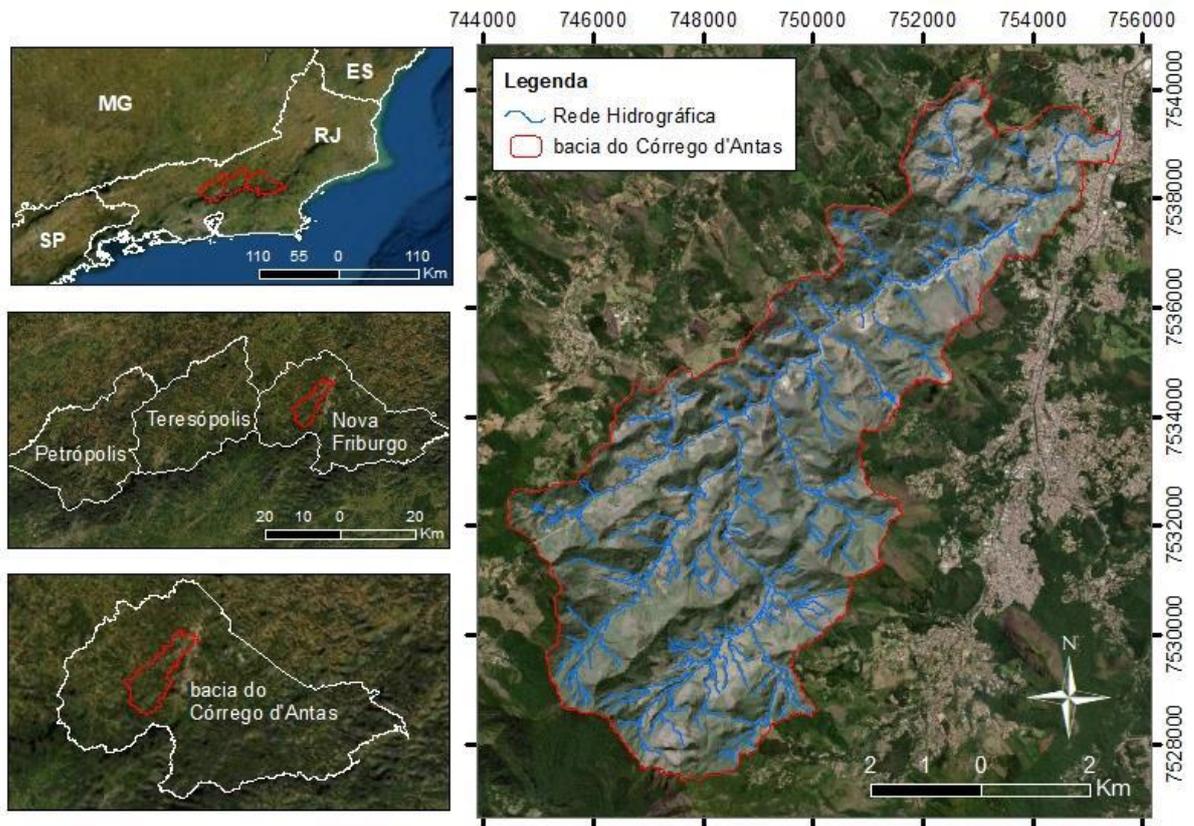


Figura 8. Localização da bacia do Córrego d'Antas, no município de Nova Friburgo, situado na região serrana do Estado do Rio de Janeiro.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O mapa da suscetibilidade à ocorrência de incêndios foi elaborado a partir do procedimento analítico-integrativo proposto por Coelho Netto *et al.* (1993). Esta metodologia é composta pelas seguintes etapas: seleção das variáveis a serem utilizadas de acordo com o tema estudado, aglutinação das classes dos mapas temáticos selecionados de acordo com as características que influenciam o tema abordado e sobreposição das informações de acordo com os mapas reclassificados, definindo pesos conforme a relevância da variável e das classes e validação dos resultados com dados de campo ou fontes confiáveis.

Neste trabalho, foi elaborada uma carta de potencial de propagação e uma carta de potencial de detonação, que integradas formam a carta de suscetibilidade ao incêndio.

Os dados de entrada utilizados foram confeccionados por Coutinho (2015) na escala 1:5.000 através do mapeamento visual de ortofotografias aéreas de 2006 com resolução espacial de 2,5 metros.

5.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS E ATRIBUIÇÃO DE PESOS PARA AS CLASSES DOS MAPAS

Neste trabalho, para a construção da carta do potencial de propagação dos incêndios foram selecionadas as seguintes variáveis/indicadores: vegetação e uso do solo, índice de posicionamento topográfico, orientação das encostas, forma geométrica do relevo, declividade; para a construção da carta do potencial de detonação foi analisado a proximidade de áreas urbanas e vias.

5.1.1 Vegetação e Uso do Solo

Primeiramente, foram atribuídos pesos conforme a probabilidade de propagação de cada cobertura vegetal e uso do solo (Tabela 2). Nesse sentido, as gramíneas e herbáceas receberam o valor mais alto devido ao combustível fino, que perde umidade por evapotranspiração mais rápido, acumulação de biomassa morta e composição de um dossel homogêneo que facilita a propagação das chamas; enquanto que a silvicultura, observada através de reconhecimento de campo como plantação de eucalipto recebeu valores mais altos devido à sua alta facilidade em entrar em combustão e resistência às chamas (SPELTZ, 1978).

A floresta secundária inicial foi classificada como combustibilidade média e a floresta secundária avançada em combustibilidade baixa devido ao seu dossel mais fechado e denso, mantendo a umidade elevada abaixo das copas mesmo em períodos de estiagem (COCHRANE, 2003). No entanto, a borda do fragmento florestal é mais suscetível ao fogo devido a rarefação do dossel e invasão de espécies pioneiras devido ao aumento da incidência solar, portanto, a borda de 50 metros para cada fragmento florestal, elaborada através da ferramenta *Buffer Wizard* do software ArcGis 10.6.1, foi reclassificada com uma nota acima da classificação original do fragmento florestal, ou seja, a borda da floresta secundária inicial foi classificada como combustibilidade alta e a borda da floresta secundária avançada como combustibilidade média.

As coberturas de cultivos foram classificadas como baixa combustibilidade pois os produtores utilizam o aceiro (áreas desmatadas ao redor da plantação) como técnica agrícola evitando a propagação do fogo para áreas além das cultivadas. Por fim, as classes “vias”, “áreas ocupadas”, “corpos hídricos”, “afloramento rochoso” e “solo exposto” foram classificadas como áreas não suscetíveis à ocorrência de incêndios (ANSOI) e posteriormente eliminadas de todas as outras variáveis através da ferramenta *Erase* do software ArcGis 10.6.1, para não serem contabilizadas no cálculo final dos valores agrupados, pois estas não possuem qualquer tipo de combustível e, portanto, não são capazes de entrar em combustão.

Tabela 2. Agrupamento das classes originais e atribuição de notas e pesos para a classificação do mapa da vegetação e uso do solo na análise da suscetibilidade de terreno aos incêndios.

Vegetação e Uso do Solo		
Classes	Nota	Peso
Gramíneas Vegetação Arbustiva Silvicultura Borda Floresta Secundária Inicial	Alta	3
Floresta Secundária Inicial Borda Floresta Secundária Avançada	Média	2
Floresta Secundária Avançada Cultivos	Baixa	1
Vias Áreas Ocupadas Corpos Hídricos Afloramento Rochoso Solo Exposto	ANSOI	X

5.1.2 Índice de Posicionamento Topográfico

O mapa do índice de posicionamento topográfico utilizado foi elaborado por Coutinho (2015) na escala 1:5.000. O *Topographic Position Index* (TPI) é simplesmente a diferença entre um valor de elevação de célula e a altitude média da vizinhança em torno dessas células. Valores positivos significam que a célula é mais elevada do que os seus arredores, enquanto valores negativos significam que é mais baixa. O quanto este pixel é mais alto ou mais baixo que seus vizinhos, somado ao seu valor de declividade pode ser utilizado para classificar seu posicionamento nas encostas. O TPI varia em função da resolução espacial (tamanho do pixel) e do raio de análise (número de pixels vizinhos a serem avaliados). Desse modo, quanto maior a resolução espacial e menor o raio de análise, maior será o detalhamento (Figura 9).

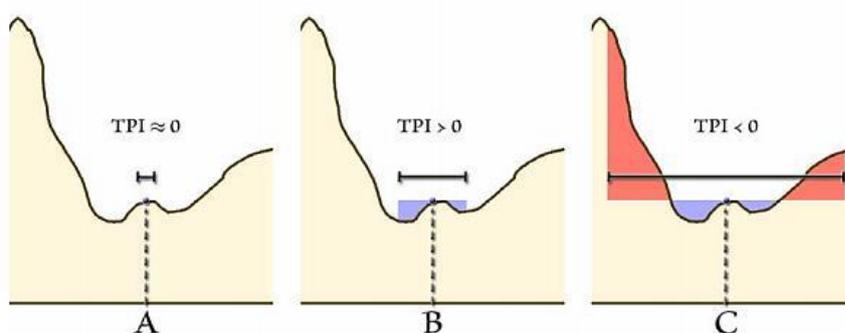


Figura 9. Valores de TPI em diferentes raios de análise. Fonte: JENNESS (2006)

Assim, divisores e alta encosta foram classificados como alta suscetibilidade pois são áreas de dispersão de fluxos; a média encosta foi classificada como média suscetibilidade por serem áreas de transferência de fluxo e fundo de vale e baixa encosta foram classificadas como baixa suscetibilidade pois são áreas de acúmulo de fluxos, e conseqüentemente, possuem combustível mais úmido (Tabela 3).

Tabela 3. Agrupamento das classes originais e atribuição de notas e pesos para a classificação do mapa do TPI na análise da suscetibilidade de terreno aos incêndios.

Índice de Posicionamento Topográfico		
Classes	Nota	Peso
Divisores	Alta	3
Alta Encosta		
Média Encosta	Média	2
Baixa Encosta		
Fundo de Vale	Baixa	1

5.1.3 Orientação das Encostas

O mapeamento da orientação das encostas foi realizado através da ferramenta *Aspect* do software ArcGis 10.6.1 derivado do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia do Córrego d'Antas na escala 1:5.000, com resolução espacial de 2,5 m. Os valores foram agrupados em Norte (315° a 45°), Leste (45° a 135°), Sul (135° a 225°) e Oeste (225° a 315°). Por fim, foram atribuídos pesos às classes conforme a suscetibilidade a ocorrência de incêndios como já explicado anteriormente (Tabela 4).

Tabela 4. Agrupamento das classes originais e atribuição de notas e pesos no mapa da orientação das encostas para classificação da exposição solar na análise da suscetibilidade de terreno aos incêndios.

Exposição Solar		
Classes	Nota	Peso
Norte	Alta	3
Leste	Média	2
Oeste		
Sul	Baixa	1

A partir do mapa da orientação, também foram classificadas as encostas que recebem maior ação de ventos com objetivo de analisar a propagação do fogo. Assim, conforme os dados apresentados na Figura 5, foram ressaltadas às encostas voltadas para Norte e Leste, uma vez que recebem a maior parte dos ventos durante todo o ano.

5.1.4 Forma Geométrica das Vertentes

O mapeamento da forma das vertentes foi elaborado a partir a geração da curvatura horizontal (expressa em %/m) através da ferramenta *Curvature* do software ArcGis 10.6.1 derivado do Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia do Córrego d'Antas na escala 1:5.000, com resolução espacial de 2,5 m. Os valores obtidos foram reclassificados em três categorias, atribuindo o intervalo de -0,038%/m a +0,051%/m para a classe intermediária, conforme sugerido por Valeriano (2008). Dessa forma, os valores negativos abaixo desse limiar são classificados como relevos côncavos, os valores acima do limite como relevos convexos e dentro do intervalo, relevos planares. Assim como no mapa do TPI, as áreas convexas foram classificadas como alta suscetibilidade pois são áreas de dispersão de fluxos, áreas retilíneas classificadas como média suscetibilidade por serem áreas de transferência de fluxo e côncavas classificadas como baixa suscetibilidade pois são áreas de acúmulo de fluxos.

Por fim, foram atribuídos pesos às classes conforme a nota dada a suscetibilidade a ocorrência de incêndios (Tabela 5).

Tabela 5. Agrupamento das classes originais e atribuição de notas e pesos para a classificação do mapa da forma geométrica das vertentes na análise da suscetibilidade de terreno aos incêndios.

Formas Geométrica das Vertentes		
Classes	Nota	Peso
Convexo	Alta	3
Retilíneo	Média	2
Côncavo	Baixa	1

5.1.5 Declividade

O mapa da declividade da bacia do Córrego d'Antas utilizado foi elaborado por Coutinho (2015) na escala 1:5.000. As classes de declividade originais foram reagrupadas de acordo sua importância na propagação do fogo (Tabela 6). Assim, conforme Silvani *et al.* (2012) encostas com declividade até 20° foram classificadas como baixa suscetibilidade à propagação, encostas entre 20° e 30° como média suscetibilidade e acima de 30° como alta suscetibilidade.

Tabela 6. Agrupamento das classes originais e atribuição de notas e pesos para a classificação do mapa da declividade na análise da suscetibilidade de terreno aos incêndios.

Declividade		
Classes	Nota	Peso
> 30°	Alta	3
20°-30°	Média	2
0°-20°	Baixa	1

5.1.6 Potencial de Detonação

Para iniciar a combustão é necessária uma fonte de calor, ou seja, uma fonte de ignição, seja antrópica ou natural, sendo raras as condições para ocorrer uma combustão espontânea. Nesse estudo, para avaliar o risco de ignição da bacia do Córrego d'Antas foram abordados dois fatores antrópicos: proximidade de áreas urbanas e proximidade de vias/estradas. Para ambas foram criadas zonas de influências, através da ferramenta *Buffer* do software ArcGis 10.6.1, de 50 m para as vias e 150 e 300 m para áreas urbanas (Tabela 7). Essas distâncias foram escolhidas a partir da análise da distância mais próxima entre os incêndios e as áreas urbanas e estradas, utilizando a ferramenta *Near Distance*. Por último, as classes de alta

suscetibilidade das duas variáveis foram agrupadas para ter como resultado uma carta de potencial de detonação.

Tabela 7. Atribuição de notas e pesos conforme a zona de influência de áreas urbanas e vias para a carta do potencial de detonação.

Potencial de Detonação		
Buffer	Nota	Peso
50 m da via	Alta	3
Até 150 m da área urbana	Alta	3
Entre 150 e 300 m da área urbana	Média	2
> 300 m da área urbana	Baixa	1

5.2 VALIDAÇÃO DA CARTA DE SUSCETIBILIDADE AO INCÊNDIO

Para a validação do mapa de suscetibilidade a ocorrência de incêndios, foram mapeadas áreas queimadas na plataforma *Google Earth Pro* entre os anos de 2004 e 2010. Os incêndios primeiramente foram delimitados através da ferramenta “adicionar polígonos” em formato *kml* e depois convertido em formato *shapefiles* no *software* ArcGis 10.6.1.

5.3 DEFINIÇÃO DOS PESOS DOS MAPAS DAS VARIÁVEIS

Para a carta do potencial de propagação, os incêndios mapeados foram sobrepostos com as cartas de cada variável para determinar sua relevância na propagação dos incêndios. Em seguida, foram incorporados pesos entre 0 e 1 para as cartas das variáveis conforme os resultados obtidos. Desse modo, o peso das classes é potencializado pelo peso das cartas, conforme seu nível de relevância. Nesse contexto, a vegetação e uso do solo foi considerada o parâmetro mais significativo, seguido pelo mapa do índice de posicionamento topográfico (TPI), orientação das encostas e por último, pela forma das vertentes, com pesos 0.4, 0.3, 0.2 e 0.1, respectivamente. Por fim, a elaboração da carta de propagação foi elaborada conforme a equação abaixo:

$$PP = (0,4 \times VU + 0,3 \times TPI + 0,2 \times Or + 0,1 \times Fg)$$

Onde,

PP = potencial de propagação dos incêndios

VU= vegetação e uso da terra

TPI= índice de posicionamento topográfico

Or = orientação de encostas

Fg = forma geométrica da encosta

Os resultados obtidos no equacionamento dos valores atribuídos aos condicionantes da propagação dos incêndios, foram agrupados em três classes com intervalos iguais, variando de 3,0 a 1,0 como classificação de valores alto, médio e baixo, respectivamente, como na Tabela 8.

Tabela 8. Valores agrupados para a classificação da carta de propagação dos incêndios a partir do equacionamento das variáveis escolhidas.

Classes	Valores
Alta	3,0 - 2,4
Média	2,3 - 1,7
Baixa	1,6 - 1,0

Por último, a carta da probabilidade de propagação foi então correlacionada com a carta do potencial de detonação, resultando no mapa da suscetibilidade aos incêndios na bacia do Córrego d'Antas. Para isso, foi atribuído peso maior (0,6) para a carta do potencial de detonação e menor (0,4) para a carta da probabilidade de propagação, pois mesmo em condições de terreno mais suscetíveis à propagação de incêndio, sem fonte de calor (ignição) não há combustão. Por fim, esse cálculo resultou novamente no mesmo conjunto de valores agrupados (Tabela 8).

$$STi = (0,6 \times \text{Detonação} + 0,4 \times \text{Propagação})$$

Onde,

STi = suscetibilidade de terreno ao incêndio

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram mapeados um total de 51 incêndios entre 2004 e 2010, queimando um total de 0,89 km², o que corresponde a 1% da área da bacia (Figura 10). O tamanho médio dos incêndios mapeados foi de 17.504 m² (ou 1,75 ha), com o maior incêndio apresentando uma área queimada de 138.349 m² (ou 13,84 ha) e o menor incêndio com 504 m².

A maioria dos incêndios mapeados ocorreu em 2010, porém, não é possível afirmar que esse ano realmente apresentou um maior número em razão da ferramenta utilizada para mapeá-los. A plataforma *Google Earth* disponibilizava uma pequena quantidade de imagens ao ano (no máximo duas vezes ao ano) e por vezes tinham anos que não possuíam imagem. Além disso, muito poucas eram as imagens com resolução suficiente para identificar uma área queimada. Dessa forma, os incêndios mapeados não servem como ferramenta para estudar a frequência ou a distribuição temporal dos incêndios na bacia, mas pode ser utilizado para validação dos mapas produzidos nesse trabalho.

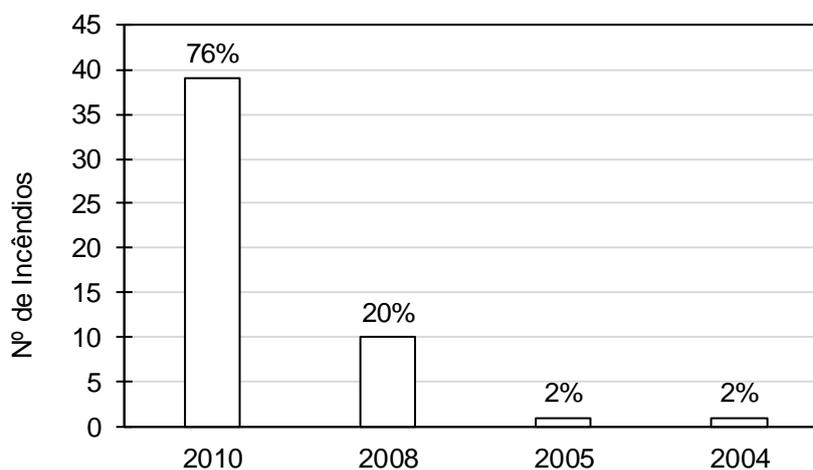


Figura 10. Frequência dos incêndios mapeados.

6.1 VEGETAÇÃO E USO DO SOLO

O mapa da vegetação (Figura 11) e uso do solo apresentou predomínio da classe com alta suscetibilidade à ocorrência de incêndios (69% da área de estudo), indicando que maior parte da bacia possui cobertura vegetal e/ou uso do solo que favorece a detonação e propagação do fogo (Tabela 9).

Tabela 9. Área total da bacia em relação às classes do potencial de propagação do mapa de vegetação e uso do solo.

Potencial de Propagação	Área (Km²)	Área (%)
Alto	36,51	69%
Médio	6,75	13%
Baixo	2,55	5%
Nulo	7,38	14%
Total	53,19	100%

A cobertura vegetal que apresentou maior área queimada foram as gramíneas e vegetação arbustiva, confirmando a inflamabilidade dessas vegetações (Tabela 10). Além disso, a borda dos fragmentos florestais também apresentou áreas queimadas, ratificando que essas áreas são mais suscetíveis ao fogo do que suas áreas nucleares devido ao efeito de borda e invasão das gramíneas, que tornam o ambiente mais favorável à ocorrência de incêndios. Dessa forma, a grande maioria dos incêndios mapeados (98%) ocorreram em áreas de alta suscetibilidade (Tabela 11).

Tabela 10. Distribuição espacial das áreas queimadas no mapa de vegetação e uso do solo.

Classes	Área Queimada (Km²)	Área Queimada (%)
Gramíneas	0,66	74%
Vegetação Arbustiva	0,16	18%
Borda Floresta Secundária Inicial	0,03	4%
Borda Floresta Secundária Avançada	0,02	2%
Silvicultura	0,02	2%
Floresta Secundária Inicial	0,00	0%
Floresta Secundária Avançada	0,00	0%
Cultivos	0,00	0%
Total	0,89	100%

Tabela 11. Distribuição espacial das áreas queimadas conforme o potencial de propagação do mapa de vegetação e uso do solo.

Potencial de Propagação	Área Queimada (Km²)	Área Queimada (%)
Alto	0,87	98%
Médio	0,02	2%
Baixo	0,00	0%
Nulo	0,00	0%
Total	0,89	100%

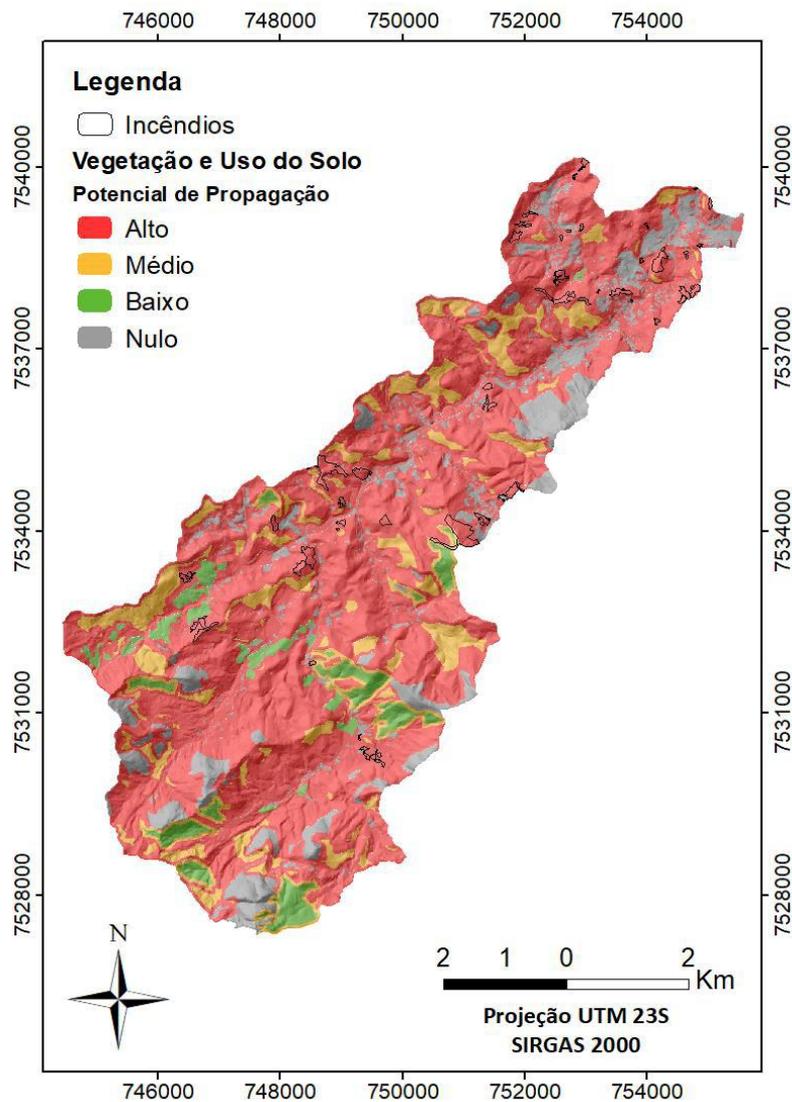


Figura 11. Mapa da vegetação e uso do solo para a carta do potencial de propagação de incêndios.

6.2 ÍNDICE DE POSICIONAMENTO TOPOGRÁFICO

O mapa do índice do posicionamento topográfico (Figura 12) demonstrou que a maior parte da bacia (49%) é classificada como média suscetibilidade, ou seja, média encosta (Tabela 12).

Tabela 12. Área total da bacia em relação às classes do potencial de propagação do mapa do posicionamento topográfico.

Potencial de Propagação	Área (Km ²)	Área (%)
Alto	13,42	25%
Médio	25,83	49%
Baixo	13,94	26%
Total	53,19	100%

A maior parte da área queimada (57%) ocorreu na classe de alta suscetibilidade (divisores e alta encosta) como era esperando (Tabela 13). No entanto, a classe de média suscetibilidade também apresentou uma alta porcentagem de área queimada (39%), que pode ser explicado pela proximidade da média encosta com as áreas urbanas, favorecendo a ignição dos incêndios.

Tabela 13. Distribuição espacial das áreas queimadas conforme o potencial de propagação do mapa do posicionamento topográfico.

Potencial de Propagação	Área Queimada (Km ²)	Área Queimada (%)
Alto	0,51	57%
Médio	0,35	39%
Baixo	0,03	4%
Total	0,89	100%

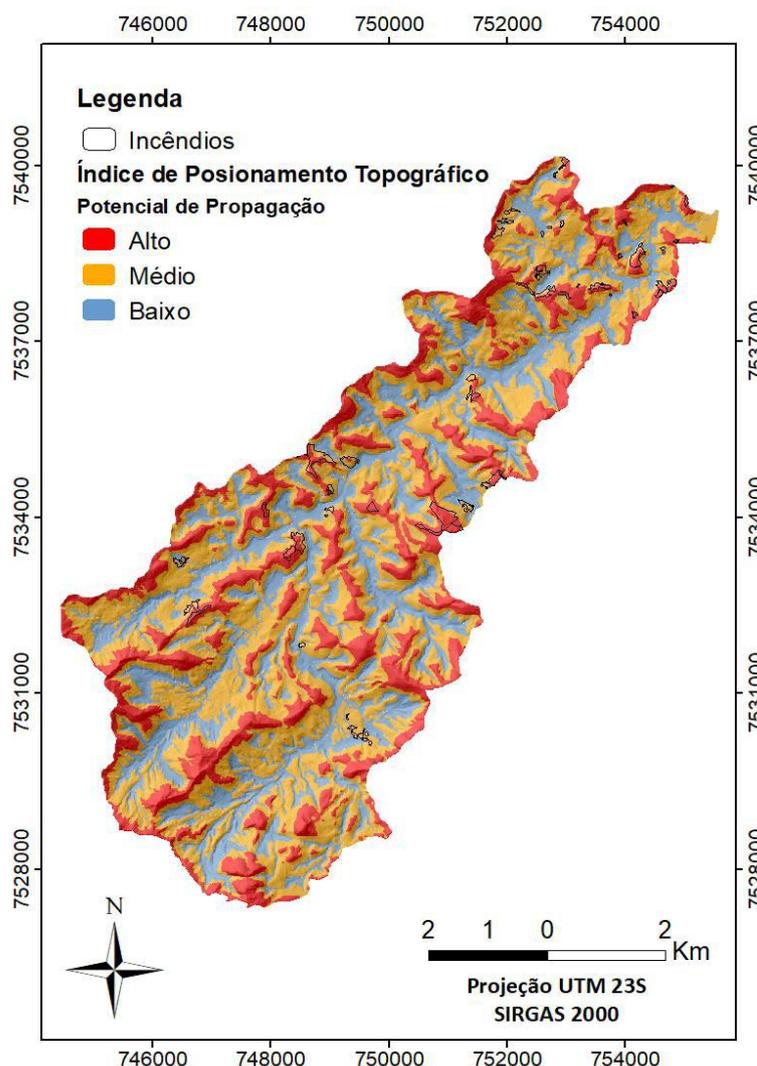


Figura 12. Mapa do índice de posicionamento topográfico para a carta do potencial de propagação de incêndios.

6.3 ORIENTAÇÃO DAS ENCOSTAS

Em relação à exposição solar, o mapa na Figura 13 indica que a bacia apresenta em sua maioria uma média potencialidade à propagação, com predominância (47%) de encostas voltadas para Leste e Oeste (Tabela 14). Os incêndios aconteceram em maior parte nessas encostas, mas também apresentaram um elevado percentual em encostas voltadas para Norte, confirmando que essa orientação recebe maior parte da radiação solar, resultando em condições mais secas e, portanto, numa maior suscetibilidade a ocorrência de incêndios (Tabela 15).

Tabela 14. Área total da bacia em relação às classes do potencial de propagação do mapa da exposição solar.

Potencial de Propagação	Área (Km²)	Área (%)
Alto	17,52	33%
Médio	25,05	47%
Baixo	10,62	20%
Total	53,19	100%

Tabela 15. Distribuição espacial das áreas queimadas conforme o potencial de propagação do mapa exposição solar.

Potencial de Propagação	Área Queimada (Km²)	Área Queimada (%)
Alto	0,40	45%
Médio	0,43	48%
Baixo	0,06	7%
Total	0,89	100%

Em relação a direção do vento, maior parte da bacia (60%) possui encostas que recebem ventos predominantes, vindos de Norte e Leste (Figura 14). Essa condição favorece a propagação de incêndios nas encostas com orientação Norte e Leste, e ao mesmo tempo intensifica a perda da umidade nas encostas voltadas para Norte, uma vez que recebem a maior parte dos raios solares e ação dos ventos.

A maior frequência dos incêndios durante os meses de agosto, setembro e outubro, como apontado por Mendonça *et al.* (2019) confirmam a propagação por ventos de vindos de Leste até o final de agosto, e de Norte do final de agosto a setembro.

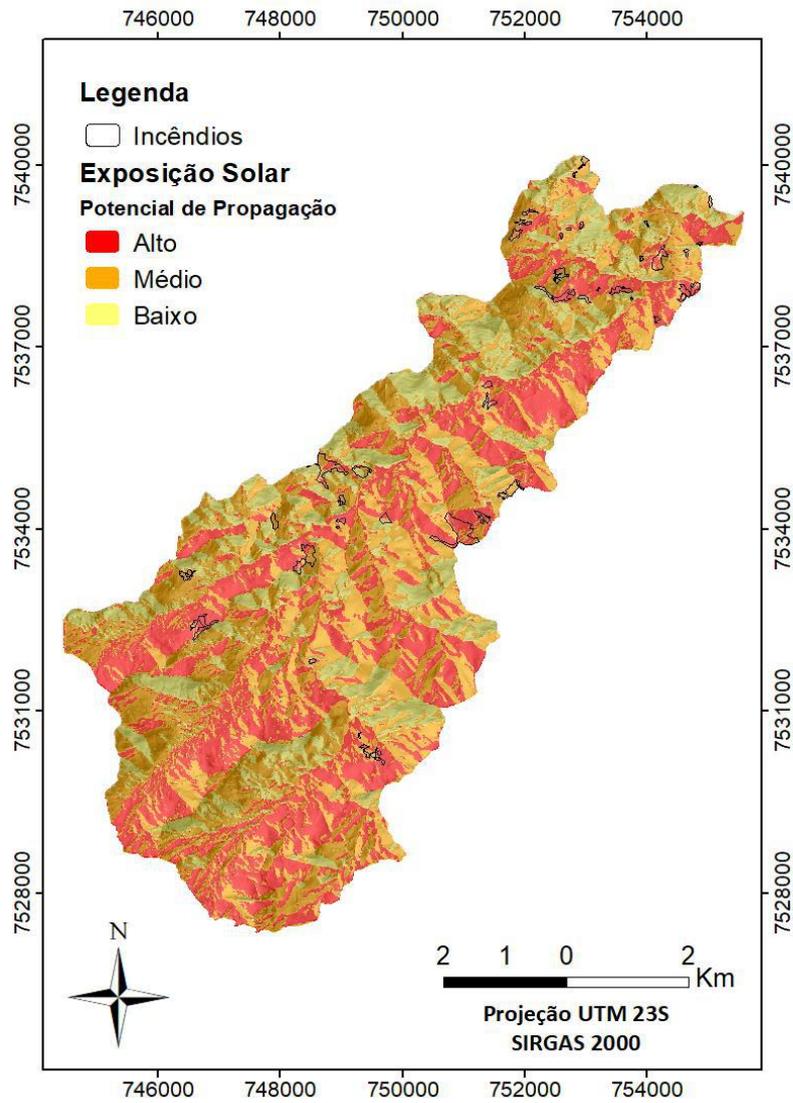


Figura 13. Mapa da exposição solar das encostas para a carta do potencial de propagação de incêndios.

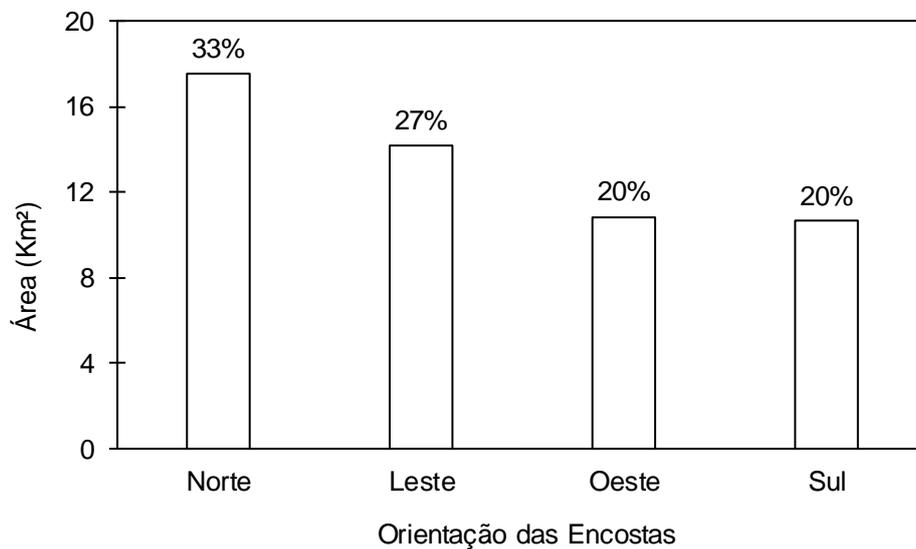


Figura 14. Distribuição da orientação das encostas na bacia do Córrego d'Antas.

6.4 FORMA GEOMÉTRICA DAS VERTENTES

O mapa da geometria do relevo (Figura 15) demonstrou uma maior porcentagem de formas convexas, mas sem diferença expressiva em relação às formas côncavas, sugerindo que a geometria do relevo da bacia é equilibrada em termos de suscetibilidade (Tabela 16).

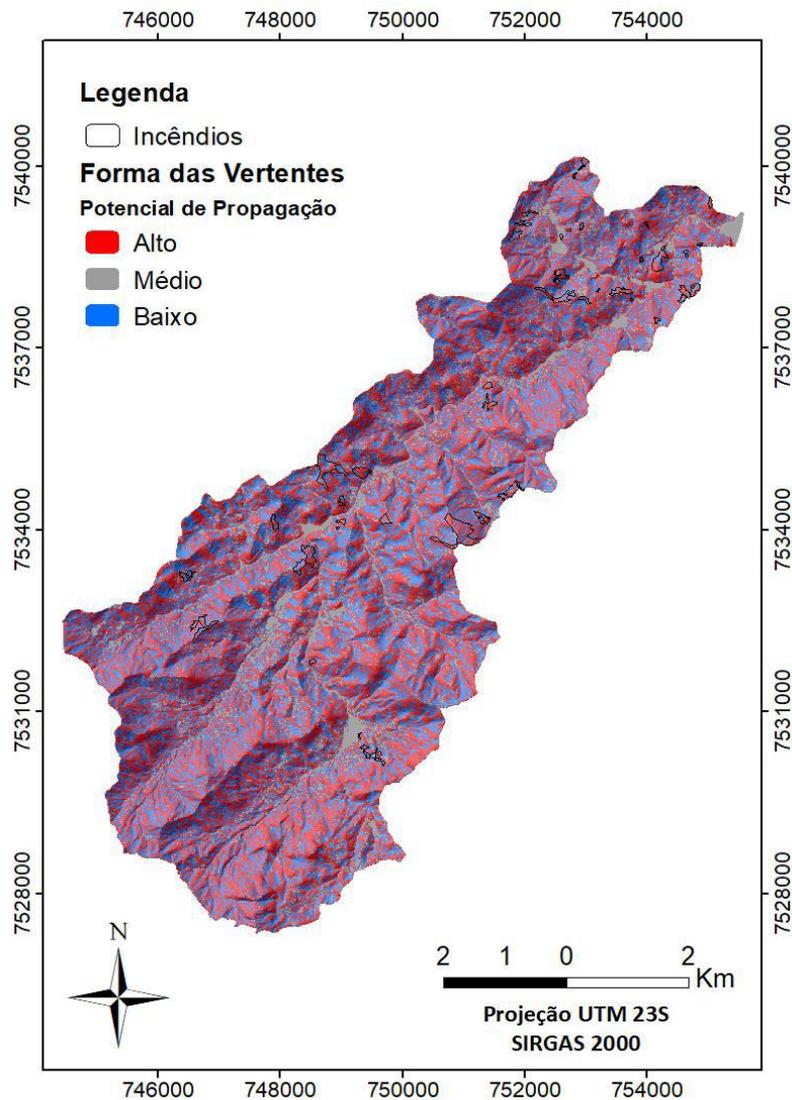


Figura 15. Mapa da forma das vertentes para a carta do potencial de propagação de incêndios.

Os incêndios mapeados ocorreram em grande parte (57%) em encostas com forma convexa, ou seja, de divergência de fluxos. Entretanto, as encostas côncavas, geralmente mais úmidas, também foram queimadas (Tabela 17), indicando que a forma das vertentes não é um elemento tão determinante da suscetibilidade a incêndios, pois a área de estudo apresenta solos poucos espessos e concavidades rasas, não havendo muita diferença de umidade entre essas

duas geometrias. Thomzhinski (2012) também ressalta que a forma geométrica das encostas não é determinante para a ocorrência de incêndios, principalmente em incêndios de grande intensidade.

Tabela 16. Área total da bacia em relação às classes do potencial de propagação do mapa das formas das vertentes.

Potencial de Propagação	Área (Km²)	Área (%)
Alto	26,04	49%
Médio	5,84	11%
Baixo	21,31	40%
Total	53,19	100%

Tabela 17. Distribuição espacial das áreas queimadas conforme o potencial de propagação do mapa das formas das vertentes.

Potencial de Propagação	Área Queimada (Km²)	Área Queimada (%)
Alto	0,51	57%
Médio	0,06	7%
Baixo	0,32	36%
Total	0,89	100%

6.5 DECLIVIDADE

O mapa da declividade (Figura 16) demonstrou que a bacia possui uma distribuição igualitária entre as classes de alta, média e baixo potencial de propagação (Tabela 18).

Tabela 18. Área total da bacia em relação às classes do potencial de propagação do mapa da declividade.

Potencial de Propagação	Área (Km²)	Área (%)
Alto	16,56	31%
Médio	17,79	34%
Baixo	18,84	35%
Total	53,19	100%

Os incêndios ocorreram em maior parte nas áreas com média declividade (39%), mas comparado às demais classes não houve uma diferença tão relevante (Tabela 19). Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que na área de estudo os divisores possuem declividades baixas (< 20°). Dessa forma, essa variável não foi incorporada no equacionamento da carta de potencial de propagação pois poderia causar uma falsa impressão de que os divisores seriam áreas de baixo potencial à propagação dos incêndios.

Tabela 19. Distribuição espacial das áreas queimadas conforme o potencial de propagação do mapa da declividade.

Potencial de Propagação	Área Queimada (Km ²)	Área Queimada (%)
Alto	0,28	32%
Médio	0,35	39%
Baixo	0,26	29%
Total	0,89	100%

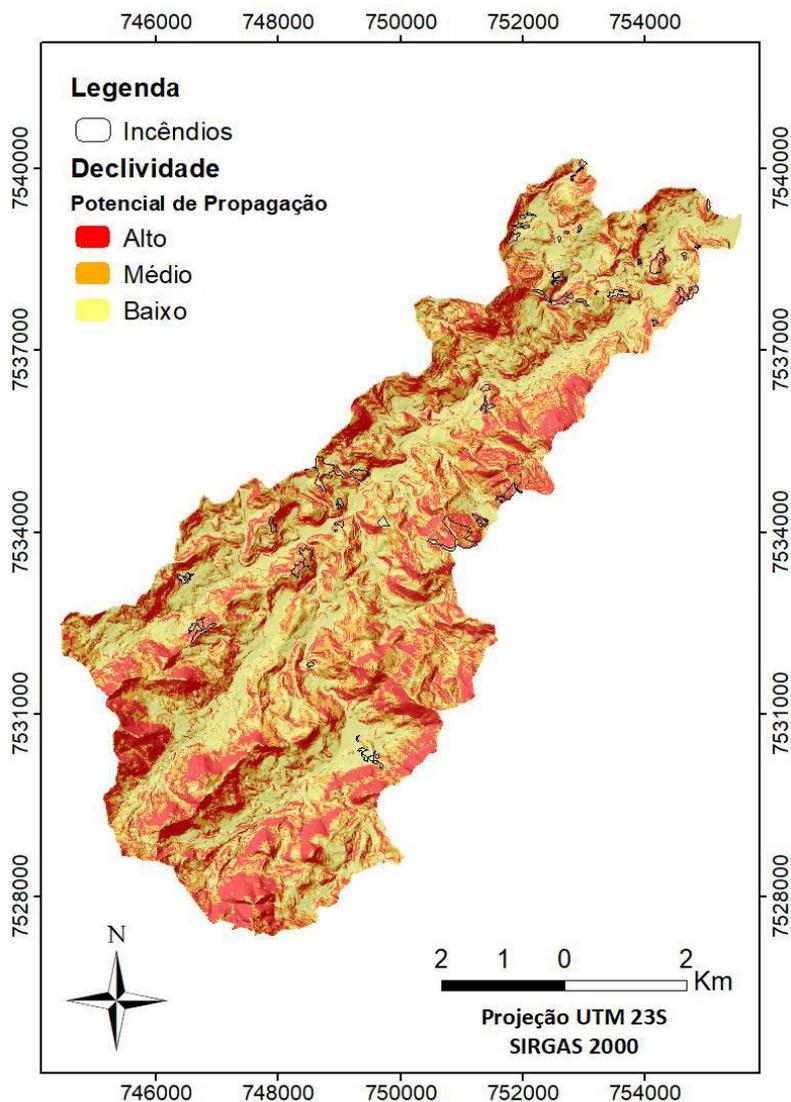


Figura 16. Mapa da declividade para a carta do potencial de propagação de incêndios.

6.6 POTENCIAL DE PROPAGAÇÃO

A carta do potencial de propagação dos incêndios demonstrou que 42% da área da bacia apresenta uma alta suscetibilidade e apenas 5% apresenta baixa suscetibilidade (Tabela

20). Os incêndios ocorreram em grande parte na classe de alta suscetibilidade (85% da área queimada) e nenhuma em baixa suscetibilidade (Tabela 21). Esses dados indicam que a escolha das variáveis e sua ordem de importância apresentaram bons resultados para a elaboração da carta de propagação dos incêndios na área de estudo.

Na Figura 17 é possível observar que as áreas classificadas como alto potencial estão concentradas em grande parte nas altas encostas e divisores, a não ser pelas encostas cobertas por florestas secundárias avançadas, classificando-a como baixo potencial de propagação.

Tabela 20. Área total da bacia em relação às classes da carta do potencial de propagação dos incêndios.

Potencial de Propagação	Área (Km²)	Área (%)
Alto	22,17	42%
Médio	21,19	40%
Baixo	2,45	5%
ANSOI	7,37	14%
Total	53,19	100%

Tabela 21. Distribuição espacial das áreas queimadas conforme as classes da carta do potencial de propagação dos incêndios.

Potencial de Propagação	Área Queimada (Km²)	Área Queimada (%)
Alto	0,75	85%
Médio	0,13	15%
Baixo	0,00	0%
Total	0,89	100%

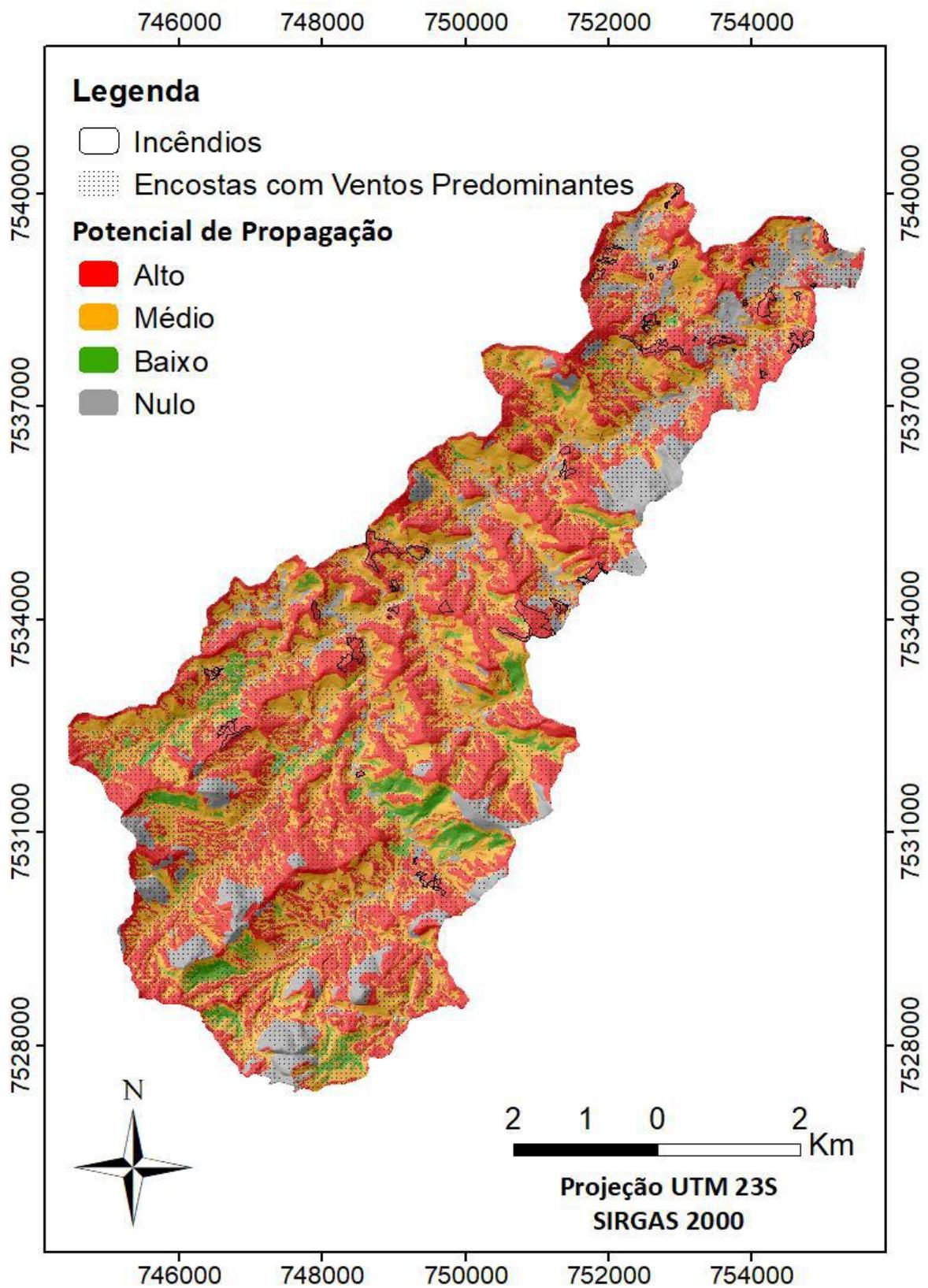


Figura 17. Mapa da suscetibilidade a ocorrência de incêndios da bacia do Córrego d'Antas.

6.7 POTENCIAL DE DETONAÇÃO

A carta do potencial de detonação (Figura 18) demonstra que 38% da bacia está situada em uma área classificada com alto potencial (Tabela 22). A distância mínima entre os incêndios e as áreas urbanas foi de até 150 m para 45 incêndios (88%); em relação às estradas foi de até 50 m para 38 incêndios (75%).

Ao contrário do mapa da suscetibilidade do terreno, e principalmente do TPI, o potencial de detonação tem as áreas mais próximas aos fundos do vale classificadas como alta suscetibilidade devido à localização das áreas urbanas e estradas. No entanto, não significa que os incêndios só se iniciam nessas áreas, visto que existem fontes de ignições como balões que podem alcançar áreas mais longínquas de influência humana e iniciar um incêndio.

A maior parte dos incêndios (52%) ocorreu em áreas de alto potencial de detonação (Tabela 23). No entanto, é importante ressaltar que uma vez iniciado a combustão, o fogo pode se propagar para áreas classificadas como baixa potencialidade de detonação. No mapa, é possível observar que os incêndios de menores proporções estão quase que totalmente inseridos nas áreas de alta e média potencialidade à detonação, enquanto que o maior incêndio (0,14 km²) têm 95% da área classificada como baixo potencial de detonação, que ao mesmo tempo está situada em encostas com ventos predominantes, ou seja, o fogo provavelmente propagou até essa área pela ação dos ventos.

Tabela 22. Área total da bacia em relação às classes da carta do potencial de detonação dos incêndios.

Classes	Área (Km²)	Área (%)
Alta	20,10	38%
Média	9,14	17%
Baixa	16,56	31%
ANSOI	7,37	14%
Total	0,89	100%

Tabela 23. Distribuição espacial das áreas queimadas conforme as classes da carta do potencial de detonação dos incêndios.

Classes	Área Queimada (Km²)	Área Queimada (%)
Alta	0,46	52%
Média	0,24	27%
Baixa	0,19	21%
Total	0,89	100%

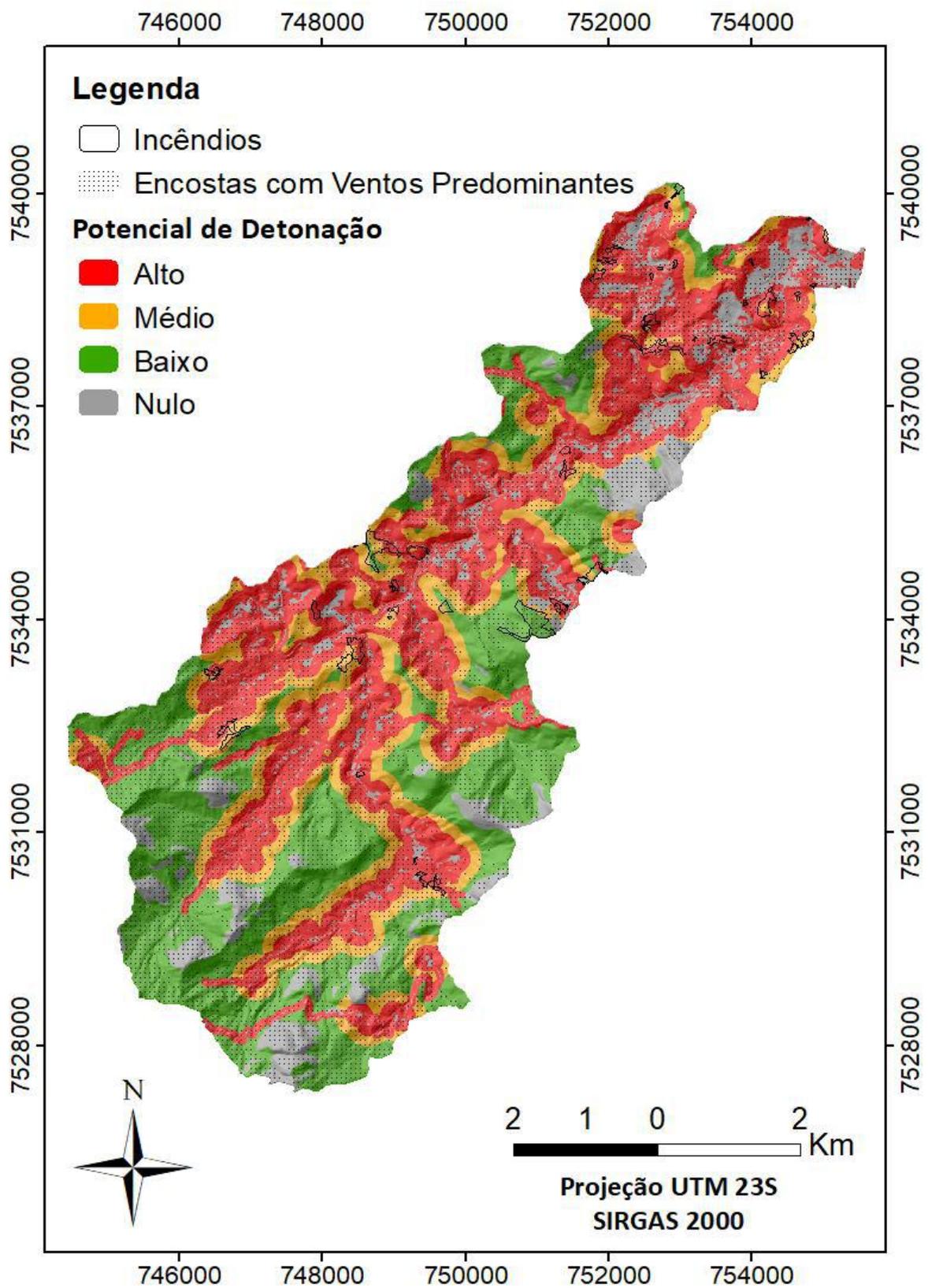


Figura 18. Carta do potencial de detonação da bacia do Córrego d'Antas.

6.8 CARTA DE SUSCETIBILIDADE AO INCÊNDIO

Por último, a carta de suscetibilidade ao incêndio (Figura 19) demonstra que 45% da bacia está situada em áreas de alta suscetibilidade, no qual 76% das áreas queimadas ocorreram nessa classe (Tabela 24 e 25). Esses dados demonstram que o cruzamento entre as cartas de propagação e detonação apresentou um bom resultado.

A carta de suscetibilidade ao incêndio ressaltou a importância de se considerar as áreas mais favoráveis à detonação por interferência humana. As altas encostas e divisores foram em sua grande maioria classificados como alto potencial de propagação, mas classificados como baixa e/ou média suscetibilidade quando estão distantes das áreas urbanas e vias, principalmente aqueles localizados na parte sul da bacia que possui características mais rurais. Na parte norte da bacia, a carta da suscetibilidade também demonstrou diferença em relação à carta do potencial de propagação, com um aumento de áreas classificadas como alta suscetibilidade devido à maior concentração de construções edificadas e vias nessa parte da bacia, que tem características mais urbanas.

Tabela 24. Área total da bacia em relação às classes da carta da suscetibilidade à ocorrência de incêndios.

Classes	Área (Km²)	Área (%)
Alta	24,07	45%
Média	13,33	25%
Baixa	8,41	16%
ANSOI	7,37	14%
Total	53,19	100%

Tabela 25. Distribuição espacial das áreas queimadas conforme as classes da carta da suscetibilidade à ocorrência de incêndios.

Classes	Área Queimada (Km²)	Área Queimada (%)
Alta	0,67	76%
Média	0,21	24%
Baixa	0,01	1%
Total	0,89	100%

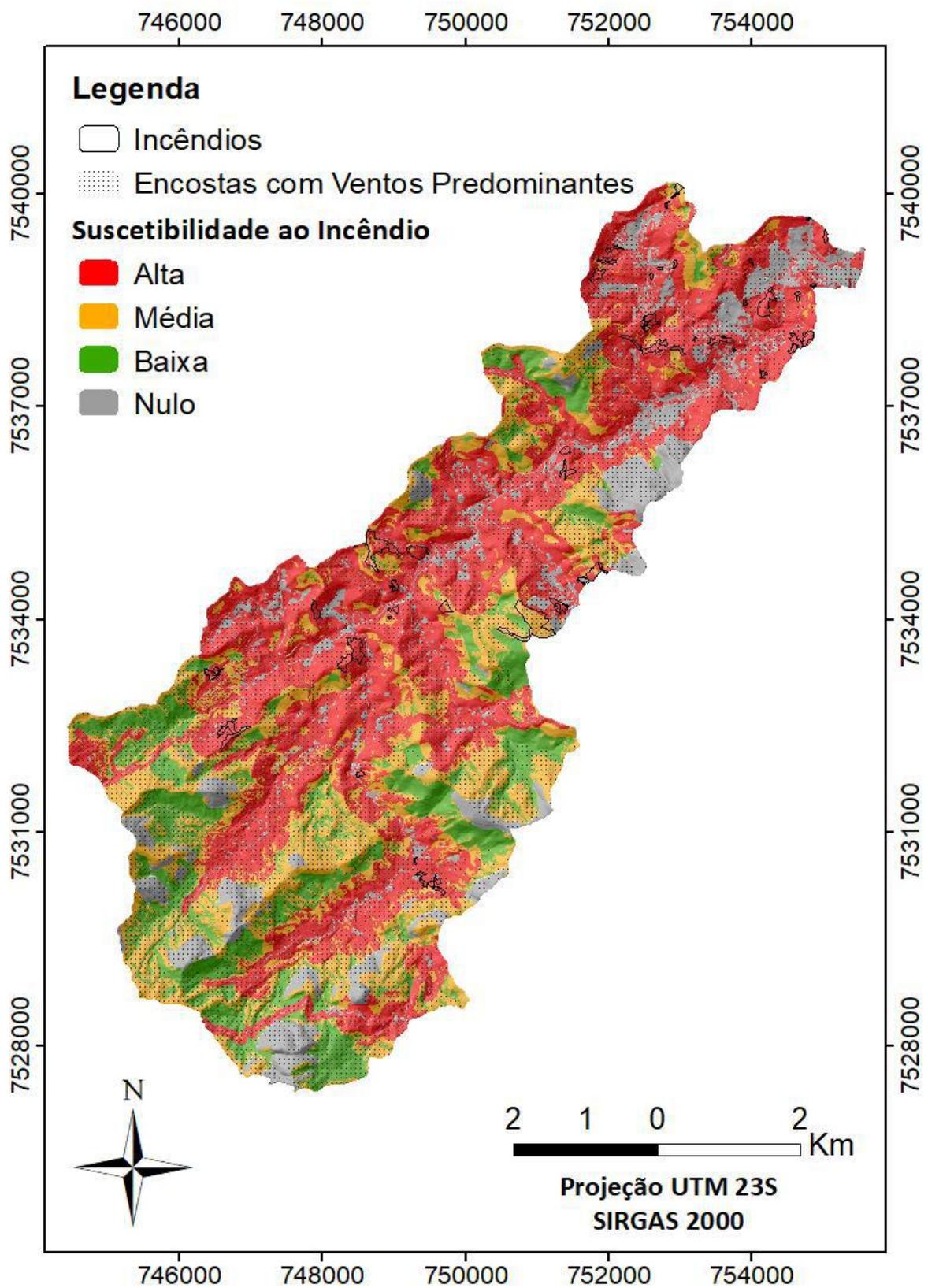


Figura 19. Mapa da suscetibilidade à ocorrência de incêndios da bacia do Córrego d'Antas.

7 CONCLUSÕES

A carta de suscetibilidade aos incêndios é o resultado da interação entre elementos (parâmetros, indicadores) que refletem a variabilidade espacial das condições de umidade no sistema geo-socioambiental, favorecendo a detonação e propagação do fogo nas encostas. A suscetibilidade é compreendida como o potencial de ocorrência do fenômeno, no caso ora focalizado, dos incêndios, visto através das condições do terreno, se referindo, portanto, às características intrínsecas da área.

A área de estudo apresenta condições de terreno muito favoráveis a propagação de incêndios, com 42% da área de estudo classificada como alta potencialidade e 40% como média potencialidade. O fator determinante para essa condição foi a grande presença de vegetações consideradas inflamáveis, sendo 69% da área da bacia classificada como alto potencial de propagação. O cruzamento da carta do potencial de propagação com os incêndios demonstrou que 85% da área queimada ocorreram nas classes de alta suscetibilidade, validando a metodologia desse estudo.

A análise de áreas favoráveis à detonação demonstrou que os incêndios ocorrem em sua maioria até 50 m das estradas e 150 m das áreas urbanas (75% e 88% respectivamente). No entanto, é difícil relacionar essa variável com a área queimada uma vez que o fogo pode se propagar a longas distâncias. Assim, a representação das encostas que mais recebem ação dos ventos no mapa provocou discussões importantes acerca da propagação dos incêndios, mesmo quando esses ocorriam em grande parte em áreas de baixo potencial de detonação. Além disso, a direção do vento predominante (Norte e Leste) coincidir com a orientação das encostas mais expostas à incidência solar (Norte) intensifica a perda de umidade do combustível, favorecendo a detonação e propagação.

Para o aprimoramento desse mapeamento, uma variável importante a incorporar no mapa de suscetibilidade seria a precipitação, analisando a diferença da suscetibilidade do terreno em períodos secos e úmidos. Além disso, também seria interessante analisar a diferença do potencial de detonação em zonas rurais e urbanas, visto que os agricultores podem ter maior consciência do perigo do fogo, uma vez que utilizam aceiros como técnica de manejo agrícola.

Por fim, a carta de suscetibilidade ao incêndio, produto do cruzamento entre a carta do potencial de propagação e do potencial de detonação, demonstrou que 45% da área da bacia está classificada como alta suscetibilidade e que 76% da área queimada ocorreu nessa classe.

Desse modo, o mapa elaborado apresentou uma boa eficácia, podendo se tornar uma ferramenta importante para a prevenção e combate dos incêndios na bacia do Córrego d'Antas, permitindo uma resolução mais rápida desse fenômeno tão frequente no município.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, S. C.; FERREIRA, A. F. Mapeamento geocológico da suscetibilidade à ocorrência de incêndios do Parque Estadual da Serra da Concórdia – Valença/RJ. *Revista Teccen.*, v. 12, n. 2, p.45-58. 2019.
- BEGON, M.; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. *Ecologia: de indivíduos a ecossistemas*. Porto Alegre: Artmed, 4ª Ed, 752 p. 2007.
- BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico, *Caderno de Ciências da Terra*, v.13, p.1-27, 1972.
- BRIDGEWATER, P. B. Landscape ecology, geographic information systems and nature conservation. In: HAINES-YOUNG, R.; GREEN, D. R.; COUSINS, S.H. *Landscape Ecology and GIS*, cap. 3, pp. 23 – 36, 1993.
- BYRAM, G. M. Combustion of forest fuels. In: DAVIS, K. P. *Forest fire: control and use*. McGraw Hill, New York, 1959. p. 61 - 89.
- CAMARGO, L. S.; SILVA, R. W.; AMARAL, S. S.; SILVA, A. P.; FERRELI, T.; SILVA, M. P. Mapeamento de áreas suscetíveis a incêndios florestais do município de Petrópolis - RJ. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 42, n. 1. 2019.
- COELHO NETTO, A. L., DANTAS, M. E.; ROSAS, R. O. (1993). Grandes domínios geocológicos da Amazônia Legal (1:2.500.000): bases para o estudo dos efeitos de borda das linhas de transmissão de energia a serem implantadas na Amazônia florestal. Relatório solicitado pela ELETROBRÁS, 26 p.
- COELHO NETTO, A. L.; SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; VIANNA, L. G. G.; ARAÚJO, I. S.; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A. P. A.; SILVA, R. P. January 2011: The Extreme Landslide Disaster in Brazil. In: MARGOTTINI, C.; CANUTI, P.; SASSA, K. *Landslide Science and Practice*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- COUTINHO, B. H. Indicadores Geo-Hidroecológicos de suscetibilidade das encostas frente a erosão e movimentos de massa em região montanhosa tropical úmida: suporte metodológico para mapeamento de riscos em diferentes escalas de análise espacial. Relatório Técnico do 2º ano Pós-Doutorado PDJ/CNPq, 2015. 157 p.
- DANTAS, M.E.; SHINZATO, E.; MEDINA, A.I.M.; SILVA, C.R.; PIMENTEL, J.; LUMBRERAS, J.F.; CALDERANO, S.B.; CARVALHO FILHO, A. Diagnóstico Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro. Oficina Internacional de Ordenamento Territorial Mineiro. Rio de Janeiro. 2005.
- DEAN, W. *A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira*. São Paulo: Cia. das Letras, 2004. 484 p. 1966.
- DIAS, M. A. Influência da topografia na dinâmica de bordas floresta-gramínea em um relevo montanhoso - Maciço da Tijuca, RJ. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

FERNANDES, M. C.; COURA, P. H. F.; SOUSA, G. M.; AVELAR, A. S. Avaliação geoecológica de susceptibilidade à ocorrência de incêndios no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Floresta e Ambiente*, v. 18, n. 3, p. 299-309, 2011.

FRAGA, J. S.; SILVA, I. M.; AMORIM, T. A.; OLIVEIRA, R. R.; COELHO NETTO, A. L. Aspectos vegetacionais de florestas secundárias relevantes à estabilidade de encostas em Nova Friburgo, RJ. *Pesquisas. Botânica*, São Leopoldo, v. 68, p. 287-309, 2015.

GANTEAUME, A.; SYPHARD, A. Ignition Sources. *In: MANZELLO, S. L. Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. Springer, 2020.

JENNESS, J. Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2. Jenness Enterprises. Disponível em: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>. Acesso em: 05/01/2021.

JESKE-PIERUSCHKA, V.; LEDRU, M. A mata atlântica no final do quaternário: dinâmicas climatobotânicas e antropogênicas desde o último glacial. *In: CABRAL, D. C.; BUSTAMANTE, A. G. Metamorfoses florestais: culturas, ecologias e as transformações históricas da Mata Atlântica*. Editora Prismas, 458 p. 2016.

LATHAM, D.; WILLIAMS, E. Lightning and Forest Fires. *In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. Forest fires*. Academic Press, 2001.

MATA, A. P. Legislação ambiental e uso atual do solo: o caso da microbacia do córrego de São Lourenço – Nova Friburgo – RJ. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, 2006.

MCARTHUR, A. G.; CHENEY, N. P. The characterization of fires in relation to ecological studies. *Australian Forest Research*, Canberra, v. 2, n. 3. 1966.

MENDONÇA, L. B.; FREITAS, L. E.; COELHO NETTO, A. L. Análise espaço-temporal dos incêndios em Nova Friburgo/RJ: subsídios ao estudo da suscetibilidade do terreno frente aos deslizamentos. XVIII Simpósio de Geografia Física Aplicada, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2019.

NAVEH, Z.; LIEBERMAN, A. S. *Landscape Ecology: Theory and Application*. New York/Berlin/Heidelberg/Tokyo: Springer Series on Environmental Management, 1984

NETO, J. C. A. S. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do relevo. *Geografia (Londrina)*, v. 22, n. 1, p. 5-25. 2013.

OLIVEIRA, R. R. O rastro do homem na floresta: sustentabilidade e funcionalidade da Mata Atlântica sob o manejo caíçara. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.

OLIVEIRA, R. R.; ZAÚ, A. S.; LIMA, D. F.; SILVA, M. B. R.; VIANNA, M. C.; SODRÉ, D. O.; SAMPAIO, P. D. Significado ecológico da orientação de encostas no Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro. *In: Oecologia Brasiliensis*, vol I, p. 523-541. Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Instituto de Biologia, UFRJ, 1995.

RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian Savanna National Park: rethinking management strategies. *Environmental Management*, v. 26, n. 6, p. 675 -684. 2000.

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

ROSSI, J. L.; CHATELON, F. J.; MARCELLI, T. Fire intensity. *In: MANZELLO, S. L. Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. Springer, 2020.

SANTOS JÚNIOR, V. J.; PRADO, R. B.; LIMA, E. P. Modelagem geocológica da suscetibilidade aos incêndios no Parque Estadual da Lapa Grande, Minas Gerais, Brasil. *Nucleus*, v. 17, n. 12. 2020.

SILVA, L. C. V.; FERNANDES, M. C.; MENEZES, P. M. L.; ARGENTO, M. S. F. Mapa geocológico de potencialidade à ocorrência de incêndios no parque nacional do itatiaia/RJ. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 61, n. 3, 2009.

SILVANI, X.; MORANDINI, F.; DUPUY, J. Effects of slope on fire spread observed through video images and multiple-point thermal measurements. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 41, p. 99-111. 2012.

SIQUEIRA, M. N.; CASTRO, S. S.; FARIA, K. M. S. Geografia e Ecologia da Paisagem: pontos para discussão. *Sociedade & Natureza, Uberlândia*, v. 25, n. 3, p. 557-566. 2013.

SOUSA, G. M.; COURA, P. H. F.; FERNANDES, M. C.; MENEZES, P. M. L. Mapeamento geocológico da potencialidade à ocorrência de incêndios no Maciço da Pedra Branca/RJ. *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Natal, Brasil, p. 25-30. 2009.

SPELTZ, G. E. Incêndio florestal: resistência de algumas espécies. *Silvicultura, São Paulo*, 2(10): 29-371. 1978.

TOMZHINSKI, G. W. Análise Geocológica dos incêndios florestais no Parque Nacional do Itatiaia. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.