

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

LUIZA DE LIMA NEVES

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A INCÊNDIOS POR MEIO DE
GEOPROCESSAMENTO: UM ESTUDO NO MUNICÍPIO DE
RIBEIRÃO PRETO, SP.**

SÃO CARLOS, SP

2017

LUIZA DE LIMA NEVES

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A INCÊNDIOS POR MEIO DE
GEOPROCESSAMENTO: UM ESTUDO NO MUNICÍPIO DE
RIBEIRÃO PRETO, SP.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt

SÃO CARLOS, SP

2017

de Lima Neves, Luiza

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A INCÊNDIOS POR MEIO DE
GEOPROCESSAMENTO: UM ESTUDO NO MUNICÍPIO DE RIBEIRÃO
PRETO, SP. / Luiza de Lima Neves. -- 2017.

80 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São
Carlos, São Carlos

Orientador: Vandoir Bourscheidt

Banca examinadora: Vandoir Bourscheidt, Luiz Eduardo Moschini, Helena
França

Bibliografia

1. Suscetibilidade a incêndios. 2. Análise Ambiental. 3. Sistemas de
Informação Geográfica. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos.
III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a defesa de dissertação de mestrado da candidata Luiza de Lima Neves, realizada em 20/10/2017:

Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt
UFSCar

Prof. Dr. Luiz Eduardo Moschini
UFSCar

Profa. Dra. Helena França
UFABC

Certifico que a sessão de defesa foi realizada com a participação à distância do membro Helena França e, depois das arguições e deliberações realizadas, a participante à distância está de acordo com o conteúdo do parecer da comissão examinadora redigido no relatório de defesa da aluna Luiza de Lima Neves.

Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt
Presidente da Comissão Examinadora
UFSCar

Dedico este trabalho ao meu tio Luiz Augusto
(*in memoriam*), que sempre apostou no meu
potencial para superar novos desafios.

Que eu continue sempre atrasada.

AGRADECIMENTOS

São inúmeros os nomes daqueles que, desde que embarquei nesse desafio de conciliar o mestrado com o trabalho profissional, estiveram ao meu lado me dando suporte e forças para continuar nesta minha caminhada.

Primeiramente agradeço à Deus pelo dom da vida e por me guiar na melhor direção rumo ao sucesso deste trabalho, me sustentando nos momentos mais difíceis.

Não tenho palavras para agradecer ao meu professor, orientador e amigo, Vandoir Bourscheidt, que aceitou embarcar nesta jornada e foi extremamente solícito quanto à sua dedicação e disponibilidade em me atender. Sua orientação foi crucial para o sucesso deste estudo.

À empresa SIGMA de Ribeirão Preto, em especial ao Justino Neto, sou grata pela flexibilização dos meus horários e permissão de conciliação do trabalho com os estudos. Agradeço também ao Victor, ao Oséias, à Beatriz e ao Danilo, que sempre me deram suporte no desenvolvimento deste trabalho. Eu provavelmente não teria êxito nesta minha jornada sem a compreensão e apoio de vocês.

Aos meus pais, Paulo e Fátima, expresso minha profunda gratidão por estarem sempre presentes, me apoiando e incentivando a seguir os melhores caminhos da vida. Sou muito grata por vocês não terem medido esforços para me colocar nesta universidade, a qual prezo com tanto carinho.

Agradeço à minha irmã, Isabela, que, com paciência e zelo, me incentivou a finalização desta dissertação.

Ao meu namorado e parceiro da vida, João Gabriel, agradeço a paciência, a prontidão e a compreensão destes anos de estudo. Sem você eu não chegaria onde cheguei.

A todos os meus familiares e amigos, em especial ao quarteto da graduação: Ana Marotti, Karol Eduarda e Leonardo Gallo, que embarcaram nesse desafio da pós-graduação comigo, e juntos pudemos superá-lo dia após dia.

À Universidade Federal de São Carlos, especialmente ao Departamento de Ciências Ambientais, no qual constitui amigos para vida toda, agradeço por me acolherem desde a graduação, sempre dando suporte aos meus anseios didáticos e pessoais.

A todos aqueles que direta ou indiretamente me apoiaram e ajudaram na elaboração deste trabalho, meus mais sinceros agradecimentos.

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A INCÊNDIOS POR MEIO DE GEOPROCESSAMENTO: UM ESTUDO NO MUNICÍPIO DE RIBEIRÃO PRETO - SP.

RESUMO

Os incêndios estão entre os principais problemas ambientais do Brasil. O país é considerado um dos grandes responsáveis pelo aumento de gases estufa no planeta proveniente das emissões da queima de biomassa vegetal. De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), além de contribuir com o aquecimento global e as mudanças climáticas, as queimadas e incêndios florestais poluem a atmosfera, causam prejuízos econômicos e sociais e aceleram os processos de desertificação, desflorestamento e perda da biodiversidade. No município de Ribeirão Preto (SP) este é um problema que vem se agravando nos últimos anos devido, principalmente, aos recentes e longos períodos de estiagem, às práticas de rituais religiosos nas proximidades de mata e ao extenso cultivo de cana-de-açúcar na região. Para analisar a ocorrência e suscetibilidade a incêndios, diferentes metodologias podem ser adotadas. Uma delas refere-se ao uso do geoprocessamento, que engloba uma série de ferramentas que são de grande importância para o levantamento e análise de informações físicas referentes ao espaço geográfico, principalmente através dos sistemas de informações geográficas (SIGs) e sensoriamento remoto. Por meio dele, é possível estudar áreas de grandes proporções de forma rápida e objetiva, além de permitir o diálogo entre diferentes tipos de dados. Por meio destas ferramentas, o presente trabalho objetivou analisar a suscetibilidade à ocorrência de incêndios no município citado mediante a identificação, o levantamento e a ponderação de indicadores geográficos previamente estabelecidos. A proposta de um novo modelo buscou avançar sobre as metodologias já existentes através da inclusão da variação temporal no estudo, bem como o uso de índices de vegetação com média resolução espacial. Os resultados indicam que o modelo é eficiente para a análise de suscetibilidade a incêndios, mas ainda é dependente da disponibilidade de dados e atualização contínua. Os mapas finais ressaltam a importância de cada indicador e enfatizam a necessidade de explorar a variação temporal no estudo.

Palavras-chave: Suscetibilidade a incêndios, Análise Ambiental, Sensoriamento Remoto, SIG.

ANALYSIS OF THE SUSCEPTIBILITY TO FIRE USING GEOPROCESSING TOOLS: A STUDY IN THE MUNICIPALITY OF RIBEIRÃO PRETO - SP.

ABSTRACT

Fires are among the main environmental problems in Brazil. The country is considered one of the great potentials for the increase of greenhouse gases in the planet coming from the emissions of the burning of vegetal biomass. According to IBAMA, besides contributing to global warming and climate change, fires also pollute the air, cause economic and social damage and accelerate the desertification processes, as well as the deforestation and loss of biodiversity. In the city of Ribeirão Preto (SP), this is a problem that has been aggravating in recent years, mainly due to the recent and long periods of drought, religious ritual practices in the nearby forest and the extensive cultivation of sugarcane in the region. In order to analyze a fire occurrence and susceptibility, different methodologies can be adopted. One of them refers to the use of geoprocessing, which encompasses a series of tools that are of great importance for the collection and analysis of physical information related to geographic space, mainly through geographic information systems (GIS) and remote sensing. They make possible to study large areas quickly and objectively, and allow the interaction between different types of data. Through these tools, this paper aims to analyze the fire outbreaks susceptibility in the mentioned municipality through the identification, survey and weighting of previously established geographical indicators. The proposal of a new model sought to advance the existing methodologies through the inclusion of temporal variation in the study, as well as the use of vegetation indices with medium spatial resolution. The results indicate that the model is efficient for a fire susceptibility analysis, but is substantially dependent on data availability and continuous updating. The final maps emphasize the importance of each indicator and stress the need to explore the temporal variation in the study.

Key-words: Fire Susceptibility, Environmental Analysis, Remote Sensing, GIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pirâmide dos efeitos das queimadas à saúde (GONÇALVES; CASTRO; HACON, 2012).....	9
Figura 2. Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência (NOAA), no período de 01/06/1998 até 31/07/2017 (Fonte: INPE).	10
Figura 3. Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência (NOAA), por estado, no período de 01/06/1998 até 31/07/2017.	10
Figura 4. Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência (NOAA) por km ² , por estado, no período de 01/06/1998 até 31/07/2017.....	11
Figura 5. Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência (NOAA), no município de Ribeirão Preto, no período de 01/06/1998 a 31/07/2017.....	11
Figura 6. Foto de um foco de fogo na região sul de Ribeirão Preto, em 04/05/2016 (autoria própria).	12
Figura 7. Fogo no canavial da usina Moreno, na região de Ribeirão Preto (SP), em 27/07/2010. Foto: Edson Silva – Folha de São Paulo.	12
Figura 8. Histórico das missões Landsat (USGS, 2015).	16
Figura 9. Imagem do satélite Landsat 8 da região de Ribeirão Preto - 01/07/2017 (USGS, 2017).	17
Figura 10. Imagem do satélite Sentinel 2A da região de Ribeirão Preto - 24/06/2017 (ESA, 2017).....	18
Figura 11. Refletividade, absorvidade e transmissividade em uma folha verde para a radiação no Infravermelho próximo (IVP) e na banda visível (V) (SANTOS, 1999 apud ONIGEMO, 2007).....	25
Figura 12. Perfil temporal do NDVI nos estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar (RAMME; LAMPARELLI; ROCHA, 2010).....	28
Figura 13. Influência da declividade no comportamento do fogo (WHELAN, 1995).....	33
Figura 14. Influência do vento no comportamento do fogo (WHELAN, 1995). À esquerda, um exemplo de uma chama sem interferência do vento, à direita o comportamento da chama sob influência do vento.	34
Figura 15. Mapa temático de localização do município de Ribeirão Preto – SP.	35
Figura 16. Mapa temático de relevo do município de Ribeirão Preto – SP.	36
Figura 17. Fluxograma da metodologia adotada.	37

Figura 18. Mapa de localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo (100 km de Ribeirão Preto).....	39
Figura 19. Gráfico da relação mensal entre áreas úmidas e precipitação média (mm).	43
Figura 20. Gráfico da relação entre a distância de malha viária/corpos d'água e o grau de risco de um foco de calor.	44
Figura 21. Representação das direções de exposição das vertentes e suas respectivas atribuições de peso de acordo a direção do vento predominante (NE), destacada em vermelho.	47
Figura 22. Fluxograma representando o modelo de interpretação dos planos de informação com a inserção do SAVI.....	48
Figura 23. Mapa das imagens do índice SAVI referentes aos meses de abril/2015 (A) e agosto/2015 (B).	49
Figura 24. Mapa das imagens do índice de precipitação referentes aos meses de abril/2015 (A) e agosto/2015 (B).	50
Figura 25. Mapa de uso e ocupação da terra do município de Ribeirão Preto – SP.....	51
Figura 26. Mapa da relação do grau de risco de incêndios em função da distância de corpos d'água.	52
Figura 27. Mapa da relação do grau de risco de incêndios em função da distância da malha viária.	52
Figura 28. Gráfico da distribuição mensal do total de raios e da precipitação média entre 1999 e 2009 em Ribeirão Preto associada ao número de focos mensais registrados entre 1998 e 2016 (A); e mapas de densidade do total de raios para fevereiro (B) e agosto (C) para o mesmo período.....	53
Figura 29. Gráfico da variação mensal do déficit/excedente hídrico e da precipitação acumulada no período de janeiro/2015 a fevereiro/2016 referente a estação meteorológica de Ribeirão Preto (centro).	54
Figura 30. Progressão do grau de risco de incêndio em função dos indicadores de ignição nos meses com disponibilidade de imagens do SAVI – abril (A), maio (B), junho (C), julho (D), agosto (E) e outubro (F).	54
Figura 31. Mapa temático de declividade (°) do município de Ribeirão Preto – SP.....	55
Figura 32. Mapa temático de exposição das vertentes associada à direção do vento predominante (NE) no município de Ribeirão Preto – SP.	56
Figura 33. Proporcionalidade dada ao cálculo do grau de risco dos indicadores de propagação.	56

Figura 34. Mapa das áreas mais suscetíveis à propagação de um incêndio no município de Ribeirão Preto.....	57
Figura 35. Mapa de suscetibilidade a incêndios em abril (com SAVI).....	58
Figura 36. Mapa de suscetibilidade a incêndios em agosto (com SAVI).....	58
Figura 37. Detalhe do mapa de suscetibilidade à ocorrência de incêndios referente ao mês de agosto. Ressalta-se a influência da malha viária (em preto) e da hidrografia (em azul) no modelo (Escala 1:30.000).....	59
Figura 38. Detalhe do mapa de suscetibilidade à ocorrência de incêndios referente ao mês de agosto. Ressalta-se a comparação entre áreas urbanizadas e outras regiões de seu entorno (Escala 1:30.000).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais características das bandas do satélite Landsat 8 (USGS, 2015).	17
Tabela 2. Principais características dos satélites Sentinel 2A e Sentinel 2B (ESA, 2015).	18
Tabela 3. Escala de perigo de incêndio do índice logarítmico de Telicyn.	21
Tabela 4. Restrições à somatória de Nesterov, de acordo com a quantidade de chuva do dia.	22
Tabela 5. Escala de perigo de incêndio do índice de Nesterov.	23
Tabela 6. Restrições à fórmula de Monte Alegre, de acordo com a quantidade de chuva do dia.	23
Tabela 7. Escala de perigo de incêndio da fórmula de Monte Alegre.	23
Tabela 8. Método de análise da vegetação proposto por Chuvieco e Congalton (1989).....	29
Tabela 9. Resumo dos fatores físicos que afetam na propagação do fogo (WHELAN, 1995).	32
Tabela 10. Média dos dados climáticos mensais para o município de Ribeirão Preto – SP (Fonte: CEPAGRI).	36
Tabela 11. Identificação das estações meteorológicas presentes em um raio de 100 km de Ribeirão Preto e suas respectivas fontes de informação.	39
Tabela 12. Ponderação das classes de uso e ocupação da terra.	43
Tabela 13. Ponderação do indicador de direção do vento atrelado à orientação da vertente. .	46
Tabela 14. Resumo das áreas pertinentes à cada classe de uso.	51
Tabela 15. Resumo de áreas de cada classe de declividade.	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1	Características gerais dos incêndios.....	4
2.1.1	Bases conceituais	4
2.1.2	Causas e propagação do fogo	6
2.1.3	Efeitos do fogo na economia, sociedade e meio ambiente	7
2.1.4	Dados estatísticos	9
2.2	Os sistemas de informações geográficas.....	13
2.2.1	Imagens multiespectrais	15
2.2.2	Modelos digitais de elevação.....	19
2.3	Índices de perigo de incêndio	19
2.3.1	Índices de perigo de incêndio utilizados no mundo	20
2.3.2	Indicadores de ignição do fogo.....	24
2.3.2.1	Precipitação	24
2.3.2.2	Índices de vegetação.....	25
2.3.2.3	Uso e ocupação da terra	28
2.3.2.4	Distância da malha viária	30
2.3.2.5	Distância de corpos d'água	31
2.3.2.6	Incidência de raios.....	31
2.3.3	Indicadores de propagação do fogo	32
2.3.3.1	Declividade.....	33
2.3.3.2	Influência dos ventos.....	34
3	METODOLOGIA	35
3.1	Descrição da área de estudo.....	35
3.2	Materiais e métodos	37
3.2.1	Precipitação	38
3.2.2	Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI).....	40
3.2.3	Uso e ocupação da terra.....	41
3.2.4	Distância da malha viária e corpos d'água	43
3.2.5	Incidência de raios	45

3.2.6	Declividade.....	45
3.2.7	Orientação das vertentes atrelada à direção do vento.....	46
3.2.8	Modelos de ignição e propagação do fogo	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Indicadores de ignição	49
4.2	Indicadores de propagação.....	55
4.3	Modelo de Suscetibilidade a incêndios.....	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

A função do fogo entre os diferentes tipos de vegetação do mundo apresenta muitas variações. No cerrado, por exemplo, o fogo auxilia no processo de germinação das sementes e ciclagem de nutrientes no solo, favorecendo sua revitalização (COUTINHO, 2002). O mesmo acontece com determinados tipos de pinheiros, muito frequentes nos Estados Unidos e Canadá, como o *Jack Pine (Pinus Banksiana)*, que depende do fogo para germinação e dispersão de suas sementes (FLANNIGAN; WOTTON, 1994).

Entretanto, os incêndios também são considerados grandes agentes de poluição da atmosfera devido às emissões de CO₂ provenientes da queima da biomassa vegetal, além de contribuírem para o desmatamento, interferirem na biodiversidade e afetarem direta e indiretamente os serviços ecossistêmicos (PEREIRA; FIEDLER; MEDEIROS, 2004). Além dos impactos ao meio ambiente, são constatados diversos prejuízos econômicos oriundos destas ocorrências, que vão desde o fechamento de estradas e espaço aéreo em decorrência da fumaça aos custos relacionados à perda de plantações pelos agricultores. Ademais, os incêndios são capazes de afetar diretamente a saúde da população, causando problemas respiratórios provenientes de sua fumaça, intoxicação e até morte por asfixia (RIBEIRO; ASSUNÇÃO, 2002).

Soares, Batista e Santos (2006) indicam que o Brasil tem sido alvo de críticas de organizações conservacionistas e instituições de outros países devido à falta de proteção de suas florestas contra o fogo. Além disso, o país não conta com estatísticas oficiais sobre a quantidade e origem dos focos de incêndio, o que dificulta muito a gestão destas áreas e a formulação de planos de ação.

Apesar da carência de dados no país, é sabido que a maioria absoluta dos casos de incêndios tem suas causas relacionadas às atividades antrópicas. A lista de motivações humanas inclui desmatamento para fins agrícolas, manutenção de pastagens para manejo de gado, extração de produtos florestais não-madeireiros, desenvolvimento industrial, reassentamento, caça, negligência, incêndios criminosos, entre outros. A pequena parcela de incêndios de origem natural fica quase que em sua totalidade atrelada à incidência de raios, muito comum em países como Canadá e Rússia (FAO, 2007).

As primeiras informações de focos de incêndios no Brasil datam da década de 80, quando o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) deu início à catalogação destas estatísticas. Ainda que as informações sejam provenientes de satélites de baixa resolução espacial (mínimo de 1km), o que implica em uma variação muito grande do local exato da ocorrência, além de

inviabilizar a análise do tamanho da área que está queimando ou o tipo de vegetação afetada, as informações provenientes deste programa são as que alimentam a base de dados do país.

De acordo com o INPE, o município de Ribeirão Preto, localizado no interior do estado de São Paulo, vêm enfrentando cada vez mais a ocorrência de focos de incêndio. Segundo a Operação Corta Fogo, do governo do Estado, a média de aumento de focos nos municípios da região de Ribeirão Preto variou de 158% a 588% na comparação de janeiro a setembro, nos anos de 2013 e 2014, enquanto o percentual do estado foi de 131% (FERNANDES, 2014). Tal crescimento pode estar atrelado aos longos períodos de estiagem que se sucederam nos últimos anos e à prática de queima da cana-de-açúcar, cultura com presença significativa no município, além de rituais religiosos em regiões de mata, amplamente divulgados pela mídia como causas prováveis de ignição do fogo (e.g. PIOLI, 2014).

Além da origem ou formação do foco, é imprescindível o estudo das suas formas de propagação para a análise dos componentes relacionados aos incêndios. O fogo tende a se alastrar devido à uma série de fatores relacionados ao próprio foco, como a propagação por irradiação (associada com a energia calorífica) ou convecção, assim como a muitos outros fatores externos que podem influenciar no seu comportamento, como o vento, a topografia da região, o nível de umidade, etc. (WHELAN, 1995). Esta diversidade de fatores que induzem a propagação, aumentando a proporção dos incêndios, faz com que o seu monitoramento seja relativamente complicado de ser realizado somente em campo. Assim, a aquisição e interpretação de dados de sensoriamento remoto, de forma a gerenciar uma porção de área maior, além de permitir interpolar diferentes indicadores físicos, vem servir como uma grande aliada na coordenação do risco de incêndios.

De acordo com Chuvieco e Congalton (1989) as primeiras aplicações do sensoriamento remoto para o mapeamento de incêndios florestais datam de 1960, quando muitos sensores infravermelhos aerotransportados foram testados para a detecção de focos de calor. Com o desenvolvimento do programa *Landsat* a partir de 1972 (USGS, 2017), muitos projetos foram conduzidos para testar a confiança de imagens de satélite para o mapeamento de incêndios florestais (CHUVIECO; CONGALTON, 1988b). Apesar de muitos conflitos entre vegetação queimada e outro tipo de cobertura terem sido encontrados nos resultados (BENSON e BRIGGS, 1978; TANAKA et al., 1983; HUSSON, 1982, apud CHUVIECO; CONGALTON, 1989), esta técnica se mostrou muito útil para uma avaliação rápida da área afetada (ISAACSON et al., 1982; ARBIOL et al., 1987 apud CHUVIECO; CONGALTON, 1988b).

O estabelecimento e acompanhamento de índices de risco de incêndios, ao longo do tempo, em grandes regiões, permite estabelecer quais as zonas potencialmente mais perigosas

ou propícias à ocorrência de incêndios, viabilizando assim a adoção de medidas preventivas e advertindo o grau de perigo (CARRÃO et al., 2002 apud ONIGEMO, 2007). De acordo com Alves e Nóbrega (2011), mesmo com a adoção de medidas de monitoramento e prevenção aos incêndios por parte de agências como o INPE e IBAMA, além de outros órgãos federais, estaduais e municipais, os incêndios ainda são considerados um sério problema no país.

Neste contexto, o presente trabalho possuiu dois objetivos gerais e integrados: (1) avançar sobre aspectos abordados em estudos anteriores, integrando dados de sensoriamento remoto e referências bibliográficas do tema em uma escala temporal mensal; e dessa forma, (2) analisar as condições que propiciam a ocorrência de incêndios no município de Ribeirão Preto. Para tal, estabeleceu-se um modelo de cálculo para a região baseado na associação de indicadores físicos de ignição (Índice de Vegetação; Uso e ocupação da terra; Distância da Malha Viária; Distância de corpos d'água; Precipitação; e Incidência de raios) e propagação (Declividade; Orientação de Vertentes e; Direção do Vento) do fogo, retornando análises mensais para o período de um ano de estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Características gerais dos incêndios

2.1.1 Bases conceituais

Um incêndio, de forma bem generalizada, pode ser definido como a ocorrência de um fogo não controlado. Em adição, segundo Cottrele apud Ferreira (2010), fogo é uma rápida e persistente reação química que combina combustível e oxigênio, face a uma fonte de calor. A representação destes três elementos é conhecida como o triângulo do fogo, onde na ausência de algum deles, não é possível obter a combustão (ALBALADEJO, 2013). O combustível pode ser considerado qualquer material passível de queima, seja ele em estado sólido, como madeira, papel ou tecido, líquido, como álcool, óleo ou graxa, ou ainda gasoso, como butano, propano, etano, etc. (CPN/SP, 2004). O comburente, ou oxigênio propriamente dito, é o elemento que se combina com os vapores inflamáveis dos combustíveis, dando vida às chamas e possibilitando a expansão do fogo. Já o calor é responsável pela energia de ativação da chama, é ele que, por meio de uma faísca, ou uma chama, dá suprimentos para inflamar o combustível. Os produtos da combustão emitem luz visível ocasionado pelo desprendimento do calor pela reação química, resultando em uma mistura de gases incandescentes que emitem energia, denominada chama ou fogo. O material combustível é o único no chamado “triângulo do fogo” efetivamente sujeito a alterações antrópicas e, conseqüentemente, passível de controle (ONIGEMO, 2007).

Algumas terminologias acerca da temática dos incêndios podem sofrer certa variação de lugar para lugar de acordo com sua origem, intensidade e forma de propagação. Ferreira (2010) relata esta confusão e ressalta que os conceitos utilizados nos modelos relativos aos incêndios florestais são desde há muito tempo discutidos e ainda hoje não obtêm unanimidade por parte da comunidade científica.

Whelan (1995) em seu livro *The Ecology of Fire* (1995) elenca algumas variáveis que considera importantes para entender e diferenciar os incêndios segundo (1) sua intensidade, (2) seu planejamento e (3) o tipo de vegetação em que ele ocorre, ou alguma combinação destes três fatores. Entretanto, sua forma de definir as terminologias demonstra bem as particularidades de cada região em que as mesmas são empregadas. Segundo o autor, na Austrália é comumente utilizado o termo *bush fire*, que pode ser definido como um tipo de incêndio incontrolado em gramíneas, arbustos ou áreas florestadas, algo equivalente ao termo *Wildland fire* que é usado nos Estados Unidos. O autor ainda elenca outros termos que diferenciam os incêndios quanto ao seu local de ocorrência ou intensidade, como os *Forest*

Fires ou *Wild Fires*. Aqui, é possível claramente observar esta diferença conceitual visto que no Brasil tanto os termos *Forest Fire* quanto *Wild Fire* dizem respeito aos Incêndios Florestais, sem diferenciação do tipo de floresta ou intensidade.

Para que não haja esta confusão no emprego destas diferentes terminologias, aqui limitaremos algumas definições de termos que utilizaremos no decorrer deste trabalho, nomeadamente *Incêndio Florestal*, *Queimadas*, *Suscetibilidade*, *Perigo* e *Risco*.

Segundo Santos e Soares (2002), *Incêndio Florestal* deve ser entendido como a propagação livre ou descontrolada de fogo em florestas ou outras formas de vegetação. Viro (1974) vai além e diz que os incêndios florestais normalmente ocorrem nos meses mais secos do verão e não são causados deliberadamente. Ainda segundo Santos e Soares (2002), diferentemente dos incêndios, as *Queimadas* são entendidas como a propagação do fogo de forma prescrita ou controlada, com um objetivo definido. Eles esclarecem que uma queimada pode, e muitas vezes ocorre, fugir do controle e se tornar um incêndio, que no caso será registrado como tal. A necessidade de planejamento efetivo da queimada para que a mesma não venha a alastrar-se e denominar-se incêndio é tratado por Kayll (1995) que diz que entre muitos estudos pesquisados por ele, “(...) todos enfatizam a necessidade de agregar um bom planejamento à experiência para se atingir eficiência e efetividade em queimas controladas” (tradução nossa).

Suscetibilidade, segundo Zêzere apud Ferreira (2010), pode ser entendida como a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno, em uma determinada área com base nos fatores condicionantes do terreno. A Autoridade Nacional de Proteção Civil de Portugal (JULIÃO et al., 2009) a define como a incidência espacial do perigo; representa a propensão para uma área ser afetada por um determinado perigo em tempo indeterminado. No contexto desta pesquisa, podemos concluir que suscetibilidade é a probabilidade de ocorrência de incêndios dadas as condições do terreno estudado.

De acordo com Ferreira (2010), enquanto a suscetibilidade trata de questões espaciais, ou “onde”, o *Perigo*, ou perigosidade, trata de questões temporais, ou “quando” há maior probabilidade de um incêndio ocorrer. Perigo é, portanto, a probabilidade de ocorrência de um processo em um determinado intervalo de tempo e em um local específico, associada à frequência de ocorrência de um processo e ao local onde ocorre (FERREIRA, 2010). O mesmo pensamento é trazido por Aguado et al. (2007), que dizem que a perigosidade é a potencialidade de um incêndio ocorrer, por um lado, em uma determinada área e tempo e, por outro, a sua capacidade de propagação.

Segundo a ANPC (JULIÃO et al., 2009), *Risco* pode ser entendido como a probabilidade de ocorrência de um processo (ou ação) perigoso e respectiva estimativa das suas consequências sobre pessoas, bens ou ambiente, expressas em danos corporais e/ou prejuízos materiais e funcionais, diretos ou indiretos. Brown e Davis (1973) distinguem os conceitos de risco e perigo de incêndio, referindo que o risco está relacionado com a probabilidade de um incêndio iniciar em função da presença e/ou atividade de agentes causadores, enquanto o perigo está relacionado com as características do material combustível (tipo, quantidade, umidade, arranjo e continuidade) que o predispõe à ignição. Além disso, Ferreira (2010) sugere que o risco está presente em situações ou áreas em que existem probabilidade, susceptibilidade, vulnerabilidade de ocorrer algum tipo de ameaça ou perigo. É uma definição dinâmica que pode alterar-se de ano para ano com o surgir de novos fatores e, com isso, alterar as áreas de risco.

2.1.2 Causas e propagação do fogo

Para entendermos as relações entre a ocorrência de um foco de incêndio e o meio físico, bem como efetivamente avaliar a suscetibilidade deste meio ao fogo, precisamos primeiramente entender alguns componentes relativos à sua formação e propagação.

No quesito formação, podemos separar os incêndios em dois campos: os incêndios de origem natural e os incêndios de origem antrópica. Dados do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO, 2014) mostram que cerca de 90% dos incêndios florestais tem origem antrópica, que são aquelas que se devem às constantes intervenções humanas, motivadas principalmente pela inserção e expansão das atividades relacionadas, em sua grande maioria, à agropecuária e outras atividades que visem à exploração econômica de determinada área, o que acarreta na supressão de áreas naturais (RODRIGUES; BORGES; FRANCA-ROCHA, 2011). Além de outros condicionantes diretos ou indiretos, intencionais ou não, como incêndios criminosos; prática de cultos religiosos; incêndios causados por cigarros; práticas de pequenas fogueiras, etc. (RIVERA-LOMBARDI, 2001). E temos ainda, mesmo que em frequência bem menor que o anterior, os incêndios de causas naturais que ocorrem, principalmente, em ocasião de temperaturas altas, baixa umidade e alta incidência de raios, sendo este último aquele que, dentro deste grupo, ocorre com mais frequência (FURB, 2015). De forma mais didática, a classificação das causas dos incêndios pode ser feita segundo o agrupamento proposto pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), que inclui 8 grupos de causa, a saber (SOARES, 1988):

- I. Raios: incêndios causados por descargas elétricas da atmosfera;

- II. Incendiários: incêndios provocados intencionalmente, por vingança ou desequilíbrio mental;
- III. Queimas para limpeza: incêndios originários do uso do fogo para limpeza do terreno, seja para fins florestais, agrícolas ou pecuários;
- IV. Fumantes: incêndios provocados por fósforos ou pontas de cigarro;
- V. Fogos de Recreação: incêndios causados por pessoas que utilizam a floresta como local de recreação, tais como pescadores e caçadores;
- VI. Estradas de Ferro: incêndios causados, direta ou indiretamente, pelas atividades das ferrovias;
- VII. Operações Florestais: incêndios originados por trabalhadores florestais em atividade na floresta, exceto os causados pelo ato de fumar;
- VIII. Diversos: incêndios cuja causa, apesar de conhecida, não se enquadra em nenhum dos sete grupos anteriores, como por exemplo balões de festas juninas.

Além disso, o fogo pode ser propagado (e possivelmente perder o controle, recebendo a denominação de incêndio), por meio de quatro diferentes formas: por irradiação, convecção, condução ou projeção de partículas. A propagação por irradiação está relacionada ao transporte de energia omnidirecional pelo ar. A propagação por convecção diz respeito ao transporte de energia pelo ar aquecido pela combustão. A condução se refere ao transporte da energia por meio de um corpo bom condutor. E a propagação por projeção de partículas se refere a este feito através da ocorrência de explosões e fagulhas que dispersam faíscas (CPN/SP, 2004).

O fogo tem alto poder de alastramento quando combinado com determinados tipos de vegetação. O fato do Brasil possuir grande diversidade de biomas e espécies vegetais atrelado às suas características climáticas, com chuvas concentradas e temperaturas elevadas, proporcionam um ambiente favorável à disseminação de focos de incêndio. O cerrado por exemplo, bioma que ocupa cerca de 22% do território nacional (MMA, 2017), tem o fogo como um de seus fenômenos mais recorrentes. Seu tipo de vegetação, composta por gramíneas de superfície, fazem com que o fogo tenha alta capacidade de se propagar. Além disto, características de vento e topografia também são fatores que facilitam a propagação da chama, assunto que trataremos particularmente no Item 2.3 desta dissertação.

2.1.3 Efeitos do fogo na economia, sociedade e meio ambiente

O fogo é um componente natural de muitos ecossistemas, sendo dessa forma um elemento necessário na complexa cadeia para a manutenção do seu delicado equilíbrio (SANDE; REGO, 2007, apud FERREIRA, 2010). Além disso, o fogo é uma ferramenta importante e muito

utilizada para alcançar os objetivos de manejo de terra. Contudo, as proporções que determinados incêndios atingem e seus respectivos impactos, podem levar estes a serem considerados como catástrofes naturais (FERREIRA, 2010). A cada ano os incêndios destroem milhões de hectares de florestas e outros tipos de vegetação, provocando a perda de muitas vidas humanas e animais, causando um imenso dano econômico, tanto em razão de recursos destruídos quanto em custos da extinção de espécies (FAO, 2007).

A FAO estima que as perdas econômicas provenientes de incêndios acidentais atinjam até R\$9.000,00/ano para alguns agricultores. No que diz respeito à saúde pública, estima-se que o número de pessoas hospitalizadas com problemas respiratórios aumenta em até 3,2% durante o período de queima na Amazônia quando comparado a outros meses. Isso, por sua vez, causa problemas à população e aumenta as despesas no setor da saúde. Ademais, os incêndios florestais levam a interrupções no fornecimento de energia elétrica. Em 1995, por exemplo, na área da ELETRONORTE ocorreram quarenta e sete interrupções que causaram grandes perdas para esta empresa, uma vez que o valor médio de cada uma é de R\$ 43.360,00. Essas rupturas no fornecimento de energia também impõem grandes perdas à sociedade como um todo. Esses incêndios produzem uma grande quantidade de fumaça e causam enormes problemas ao tráfego aéreo, levando até o fechamento de aeroportos durante períodos críticos. No final da década de 1990, por exemplo, os aeroportos de Rio Branco, Porto Velho, Conceição do Araguaia, Carajás, Marabá e Imperatriz foram fechados por um total de 420 horas. Isso causou uma perda total de cerca de R\$ 3,15 milhões durante o período (FAO, 2001).

Entretanto, os impactos financeiros destas ocorrências não são os mais devastadores. Os incêndios podem causar danos irreparáveis ao bem-estar da sociedade e à qualidade do meio ambiente de forma geral. De acordo com a FAO (2001), os incêndios nos diferentes ecossistemas brasileiros têm produzido muitos efeitos adversos em todos os segmentos da sociedade, dentre eles: (1) a poluição atmosférica; (2) os efeitos da fumaça na saúde pública em áreas críticas; (3) a interrupção dos serviços de transporte aéreo e terrestre por fumaça, como mencionado acima, afetando cidadãos e aviação comercial e civil; (4) as potenciais contribuições para a mudança climática global através da produção de gases de efeito estufa; (5) a redução na qualidade da água; (6) a interrupção da transmissão de energia elétrica; (7) as ameaças à vida e às propriedades; (8) a perda da diversidade biológica e; (9) as ameaças para plantações comerciais de árvores.

Jacques (2003) avaliou os efeitos do fogo sobre o solo e vegetação em pastagens naturais, e concluiu que a queima destas áreas deteriora as condições do solo, reduz o potencial produtivo e a qualidade da vegetação nativa. Se tratando da saúde da população, tanto os estudos de

Ribeiro (2008) e Gonçalves, Castro e Hacon (2012) no âmbito de queima de cana-de-açúcar e florestas, respectivamente, expõem os impactos negativos da emissão de poluentes para a saúde respiratória da população, em especial daqueles mais próximos à área afetada. A Figura 1 a seguir apresenta a pirâmide dos efeitos à saúde da OMS (Organização Mundial da Saúde), ilustrando os principais impactos provenientes das queimadas e a parcela da população exposta. Em linhas gerais quanto mais sério o desfecho menor a população atingida (GONÇALVES; CASTRO; HACON, 2012).



Figura 1. Pirâmide dos efeitos das queimadas à saúde (GONÇALVES; CASTRO; HACON, 2012).

Ademais, são inúmeros os estudos conduzidos com a finalidade de avaliar os efeitos do fogo sobre a qualidade do ar, do solo, da fauna, e outros comportamentos atrelados a eles, como a dispersão de espécies, variação de componentes químicos, influência em plantações de silvicultura, entre outros, dos quais uma eminente maioria ressalta em suas considerações os notáveis impactos negativos destas ocorrências.

2.1.4 Dados estatísticos

De acordo com dados do satélite de referência (NOAA 12/AQUA M-T) do Programa de Queimadas do INPE, no período de 01 de junho de 1998 até 31 de julho de 2017 o Brasil registrou mais de 3 milhões de focos de calor (Figura 2), o que representa algo em torno de 60% de todos os focos registrados em toda a América do Sul. É claro que a extensão territorial do Brasil é fator chave para esta contagem, entretanto, as especificidades de clima (tropical na maior parte do país, com média de temperatura superior a 18°C), vegetação e topografia também explicam esta proporção.

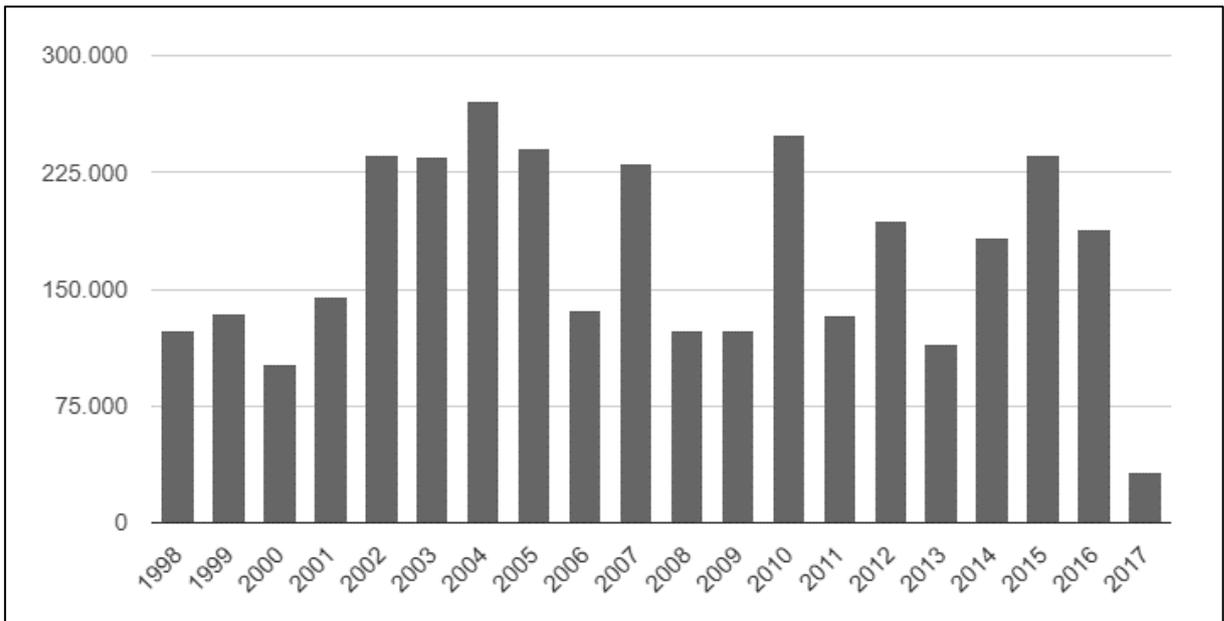


Figura 2. Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência (NOAA), no período de 01/06/1998 até 31/07/2017 (Fonte: INPE).

Dentre os estados brasileiros, Mato Grosso é aquele que registrou o maior número de focos de incêndio no período (Figura 3). Fato que pode ser explicado pela sua extensão territorial (3º maior do país), seu clima, com temperatura média de 24°C, podendo atingir a marca de 40°C sua vegetação, em grande parte constituída por cerrado e gramíneas, além da intensidade dos ventos (Governo de Mato Grosso, 2017).

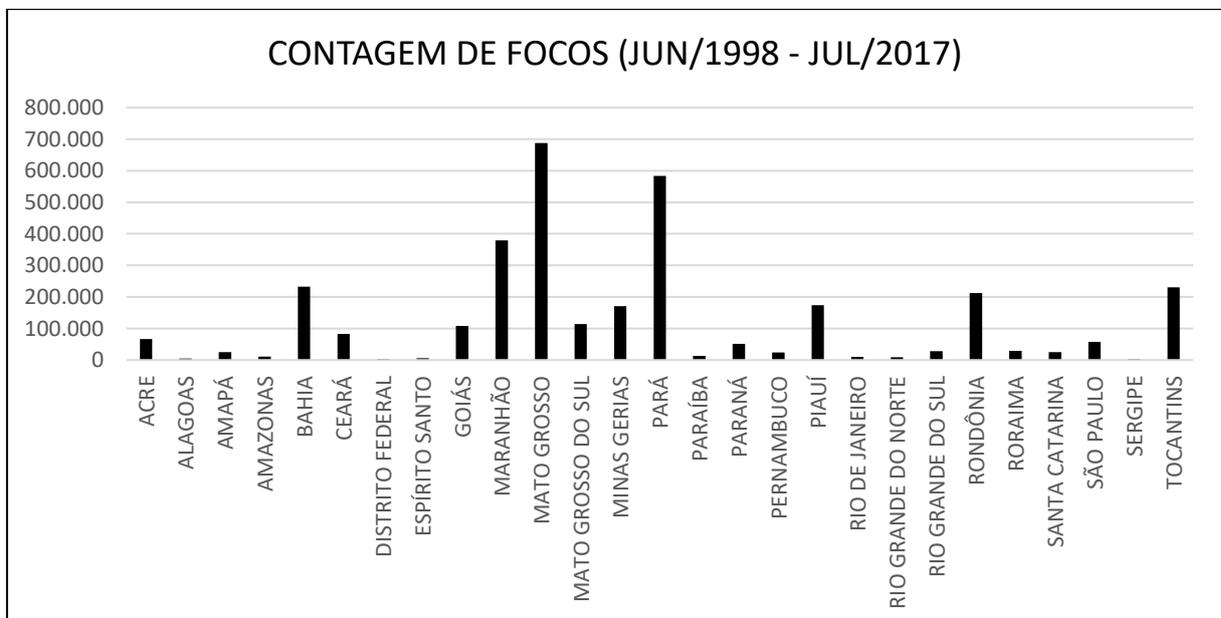


Figura 3. Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência (NOAA), por estado, no período de 01/06/1998 até 31/07/2017.

Entretanto, analisando a quantidade de focos registrados com a proporcionalidade de áreas respectivas à cada estado, Maranhão é aquele que registrou o maior número de focos por km² no período, como pode ser observado na Figura 4. Esta incidência pode estar atrelada à

frequente exploração ilegal de madeira nas diversas reservas ambientais espalhadas pelo estado e o clima quente e seco, característico entre os meses de junho e setembro, além da intensidade dos ventos, superior à média anual neste período (G1, 2016).

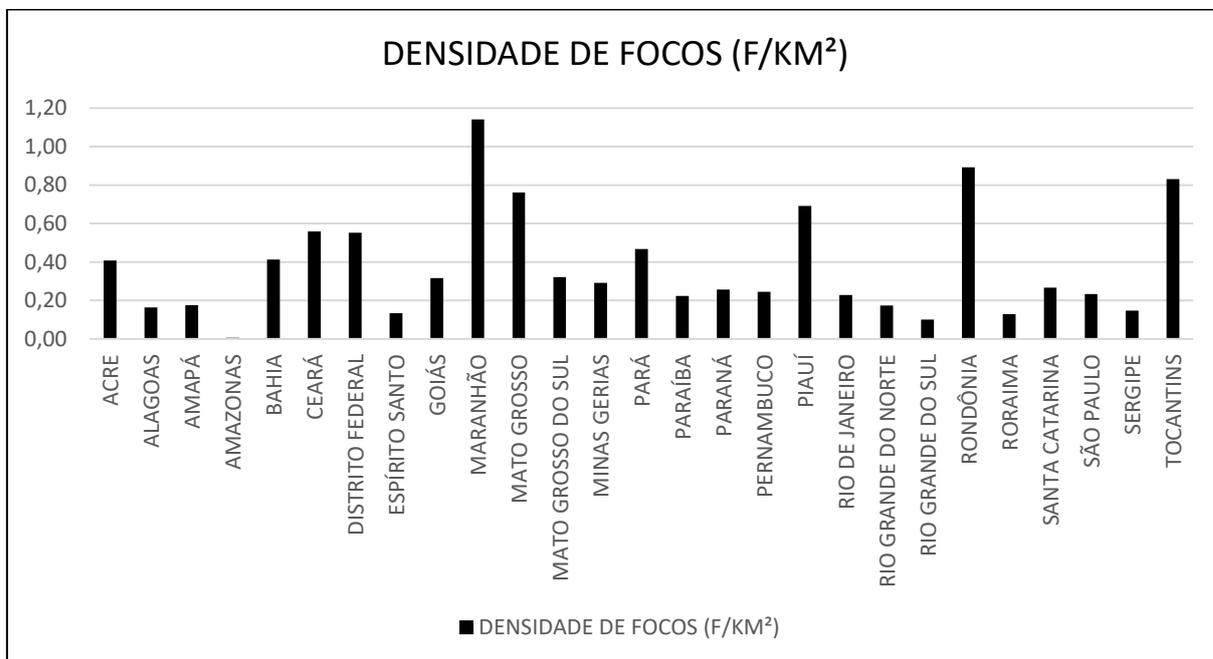


Figura 4. Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência (NOAA) por km², por estado, no período de 01/06/1998 até 31/07/2017.

Como pode ser observado, o estado de São Paulo ocupa a 17ª posição deste ranking entre os 26 estados e Distrito Federal, representando quase 2% dos focos registrados no período no país. Deste número, Ribeirão Preto é cenário de 0,6% dos focos registrados no estado. A Figura 5 abaixo mostra a variação da ocorrência de incêndios no decorrer do ano para o município, dada a amostra histórica do INPE.

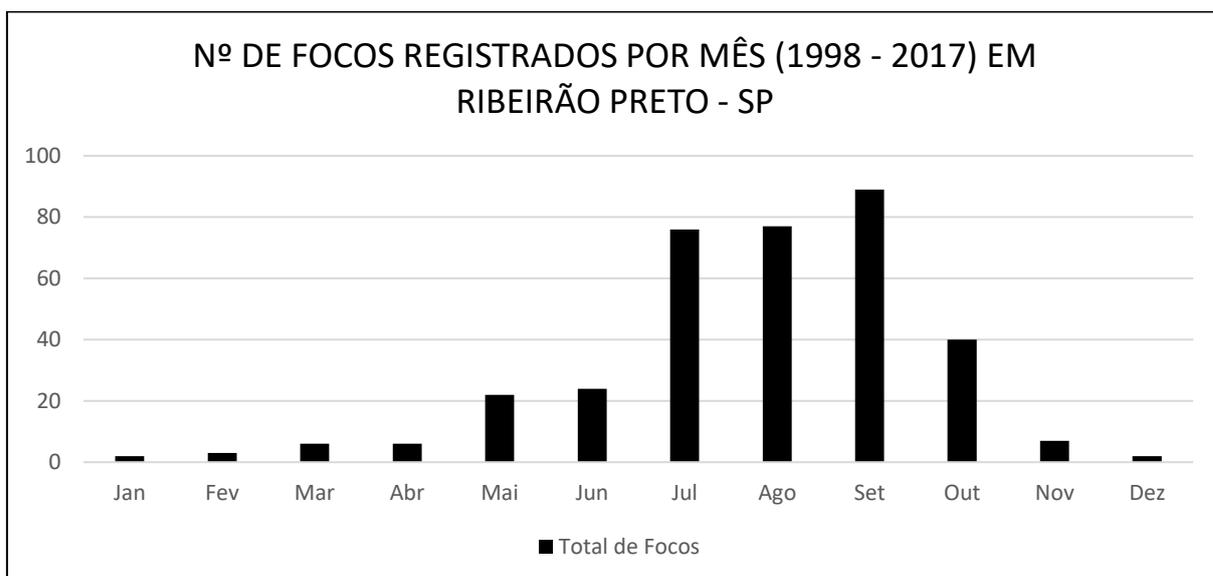


Figura 5. Série histórica do total de focos ativos detectados pelo satélite de referência (NOAA), no município de Ribeirão Preto, no período de 01/06/1998 a 31/07/2017.

Observamos que setembro é o mês com maior registro de focos, fato intimamente ligado ao período de estiagem cumulativa que compreende os meses de junho a setembro. Entretanto, os focos de calor registrados em Ribeirão Preto também estão relacionados às queimadas em culturas de cana-de-açúcar da região, que ocupa mais da metade de toda a extensão do município. Segundo Alberto Setzer, coordenador da equipe de monitoramento de queimadas do INPE, a maior parte dos focos captados por satélites na região de Ribeirão vem deste tipo de cultura (COISSI, 2013).



Figura 6. Foto de um foco de fogo na região sul de Ribeirão Preto, em 04/05/2016 (autoria própria).



Figura 7. Fogo no canavial da usina Moreno, na região de Ribeirão Preto (SP), em 27/07/2010. Foto: Edson Silva – Folha de São Paulo.

A cana-de-açúcar é uma cultura que ainda sofre com intensos processos de queima em várias regiões do país com o objetivo de facilitar as operações de colheita, ação gerida pela Lei nº 11.241 de 2002 no estado de São Paulo, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar, com planos de eliminar por completo esta prática até o ano de 2031. Segundo o Jornal Folha de São Paulo (2014), a região de Ribeirão Preto era a que mais queimava cana no estado até o fim da safra 13/14. Dados da Secretaria de Estado do Meio Ambiente mostram que um em cada quatro hectares (10 mil m²) colhidos na região nesta safra passaram pelo processo de queima da palha da cana. Entretanto, apesar de liderar o ranking, o município colheu 75% de sua safra de forma mecanizada, ou seja, sem o uso da queima, porcentagem superior ao previsto pelo protocolo ambiental para o setor, acordado entre produtores e governo em 2007 a fim de antecipar a eliminação total do processo de queima de 2031 para 2017. Hoje, Ribeirão Preto já faz uso da mecanização em praticamente todo o território (CASTRO, 2016), o que em teoria, elimina o processo de queima, entretanto, não são raros os relatos de focos em canaviais de fonte acidental ou criminal. Independente da causa, o fato é que incêndios neste tipo de plantação ainda são recorrentes e por isso merecem atenção especial na formulação de planos de ação e gerenciamento ao combate de incêndios.

2.2 Os sistemas de informações geográficas

Os sistemas de informações geográficas (ou SIGs) são ferramentas computacionais capazes de adquirir, armazenar, recuperar, transformar e emitir informações espaciais (CÂMARA; ORTIZ, 1998). É por meio destes sistemas que é possível analisar atributos do plano com o uso de informações de um banco de dados e sistemas de coordenadas definidos. Calijuri e Loures (2006) ressaltam que o SIG é um sistema projetado para a coleta, armazenamento e análise de objetos e fenômenos, sustentados pela sua localização geográfica. Portanto, ele pode ser utilizado em estudos relativos ao meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real (BURROUGH, 1986 apud CÂMARA; ORTIZ, 1998).

De acordo com Davis e Câmara (2001), devido a ampla gama de aplicações de um SIG, que inclui temas como agricultura, floresta, cartografia, cadastro urbano e redes de concessionárias (água, energia e telefonia), há pelo menos três grandes maneiras de utilizá-lo: (1) como ferramenta para produção de mapas; (2) como suporte para análise espacial de fenômenos; e (3) como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial. Para tanto, é necessário que os dados de entrada no SIG

estejam georreferenciados, ou sejam, possuam localização bem definida dentro de um determinado sistema de coordenadas.

O SIG, ou o geoprocessamento de forma mais ampla, é capaz de dar subsídio para a gestão, monitoramento e processo de tomada de decisão em diversos campos. No ramo da agricultura por exemplo, através da aplicação de índices específicos, é possível avaliar espacialmente a produtividade de certas culturas. Além disso, ele pode ser utilizado para a contagem de gado, controle de pragas, mapeamento de árvores e adequação das propriedades rurais quanto às áreas de preservação permanente e reservas legais. No ramo da saúde, o SIG pode auxiliar no mapeamento de locais de epidemias e monitoramento espacial de doenças. No campo ambiental, é capaz de auxiliar em diversas atividades como no monitoramento de distribuição de espécies, mapeamento de espécies arbóreas, análise da qualidade vegetativa, elaboração de zoneamento ambiental com delimitação de áreas de vulnerabilidade, identificação de focos de incêndios e quantificação da área queimada, entre muitos outros.

Onigemo (2007) explica que há diversas maneiras de detectar incêndios, dependendo da extensão da área a ser monitorada e característica do local, entre as quais se destacam as torres de observação, vigilância terrestre por postos de vigilância, patrulhamento aéreo com aeronaves e monitoramento por imagens de satélites. Entretanto, o autor também esclarece que em um país como o Brasil, o monitoramento dos incêndios florestais, em nível nacional e em escalas regionais, por imagens de satélite, é o método mais eficiente devido ao seu baixo custo e larga escala. De acordo com Jaiswal et al. (2002), uma avaliação precisa dos problemas dos incêndios e decisões sobre os meios de se resolvê-los só podem ser satisfatoriamente feitos quando um mapa de zonas de risco é analisado. Para tanto, o autor ressalta que os dados de satélites têm papel fundamental na identificação e mapeamento de incêndios e registro da frequência de cada tipo de vegetação afetada.

O Brasil conta hoje com o serviço de monitoramento de queimadas do INPE, que fornece em tempo real informações acerca de áreas de risco, áreas queimadas, resumo de informações por estado e estatísticas históricas. Para a análise são utilizados todos os satélites que possuem sensores óticos operando na faixa termal-média de 4um e que o INPE consegue receber. No momento são processadas operacionalmente, na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais - DSA as imagens AVHRR/3 dos satélites polares NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19 e METOP-B, as MODIS dos NASA TERRA e AQUA, as VIIRS do NPP-Suomi, e as imagens dos satélites geoestacionários, GOES-13 e MSG-3. Cada satélite de órbita polar produz pelo menos dois conjuntos de imagens por dia, e os geoestacionários geram várias imagens por hora, sendo que no total o INPE processa mais de 200 imagens por dia especificamente para detectar focos de

queima da vegetação. As recepções são feitas nas estações de Cachoeira Paulista, SP e de Cuiabá, MT. O atual satélite de referência do INPE, ou seja, aquele que fornece os dados estatísticos para o órgão, é o AQUA_M-T (sensor MODIS, passagem no início da tarde), cuja resolução espacial é de 1km. Isto significa dizer que o pixel da imagem proveniente deste satélite corresponde a 1km x 1km do terreno, sendo assim, existe uma imprecisão considerável do local exato de ocorrência do foco (aproximadamente 400m, de acordo com o instituto). Além disso, devido à uma associação da resolução espacial e altura em que trafega o satélite, somente frentes de fogo com pelo menos 30m de extensão por 1m de largura podem ser identificadas pelo mesmo, e ainda que o foco possua estas dimensões, ele será representado como tendo 1km² no mínimo, pois ele corresponderá à um pixel de queima. Além disto, o INPE também elenca alguns fatores que podem ocasionar na não detecção de um foco: (1) frentes de fogo com menos de 30m; (2) fogo apenas no chão de uma floresta densa, sem afetar a copa das árvores; (3) nuvens cobrindo a região (nuvens de fumaça não atrapalham); (4) queimada de pequena duração, ocorrendo entre as imagens disponíveis; (5) fogo em uma encosta de montanha, enquanto que o satélite só observou o outro lado; (6) imprecisão na localização do foco de queima, que no melhor caso é de cerca de 1km, mas podendo chegar a 6km. Dadas estas circunstâncias, é imprescindível a adoção de modelos alternativos de predição de incêndios que façam uso de imagens com melhor resolução espacial, e conseqüentemente ofereçam maior capacidade em identificar e interpretar os pormenores de cada região.

Em entrevista à revista MundoGEO, em 2001, o então professor do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, Carlos Vettorazzi, explicou que a análise de risco de ocorrência de incêndio por meio do geoprocessamento pode fornecer informações acerca dos fatores envolvidos no risco de início e propagação de incêndios, tais como: condição da cobertura vegetal; condições meteorológicas; características do relevo; atividades antrópicas etc. Dessa forma, o SIG permite a eficiente integração de dados de observação da Terra com fatores geográficos relevantes, tais como a vegetação, topografia e meteorologia (AGUADO et al., 2007). É por meio dele que estas variáveis podem ser levantadas, avaliadas e integradas, podendo inferir ou predizer ocorrências como os incêndios.

2.2.1 Imagens multiespectrais

É comum, até nos dias atuais, o uso de imagens de resolução espacial¹ de até 1 km para a análise da superfície. Isto porque estas imagens possuem maior tempo de revisita (resolução

¹ A resolução espacial está relacionada com a capacidade do sensor em detectar os objetos da superfície terrestre. Desta forma, quanto melhor a resolução espacial, menor o objeto distinguível pelo sensor (OLIVEIRA, 2016).

temporal) e muitas vezes esta frequência temporal é uma informação essencial para o alcance dos objetivos do trabalho. Entretanto, tais imagens são consideradas de baixa resolução, e não oferecem tanto detalhamento nos seus resultados, principalmente quando tratamos de escalas municipais. Há disponibilidade de imagens de satélite gratuitas, como as do programa *Landsat* e *Sentinel*, de 30m e 10m, respectivamente, que se mostram muito viáveis para trabalhos nesta escala. Estas missões surgiram com a proposta de servir como ferramentas de apoio ao acompanhamento de práticas agrícolas e florestais, gerenciamento das mudanças de uso e ocupação da terra, além de fornecer diversos índices de plantas, tais como índice de clorofila da área foliar e índices de estresse hídrico.

O programa *Landsat* é fruto de uma iniciativa conjunta entre o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Seu primeiro satélite foi lançado em 1972, o *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS-1), que logo foi renomeado para *Landsat 1*. Os lançamentos do *Landsat 2*, *Landsat 3*, *Landsat 4* e *Landsat 5* foram realizados em 1975, 1978, 1982 e 1984, respectivamente. O *Landsat 6*, lançado em 1993, não obteve sucesso em atingir sua órbita e foi descontinuado. O *Landsat 7* foi lançado em 1999 e é capaz de fornecer imagens desde então, mas com presença excessiva de ruídos desde maio de 2003. O satélite mais recente do programa é o *Landsat 8*, lançado em 2013, com previsão de lançamento do *Landsat 9* em 2020 (Figura 8).



Figura 8. Histórico das missões *Landsat* (USGS, 2015).

A riqueza espectral e a ampla abrangência de cada cena do *Landsat* tornaram este programa uma solução desejável para trabalhos na escala de até 1:25.000. O *Landsat 8* possui 11 bandas, sendo 1 pancromática, 8 multiespectrais e 2 termais (Tabela 1). O tamanho de sua cena é de 185,0km x 185,0km e sua resolução temporal é de aproximadamente 16 dias (ENGESAT, 2017).

Tabela 1. Principais características das bandas do satélite *Landsat 8* (USGS, 2015).

Nº da Banda	Nome da Banda	Comprimento de Onda (nm)	Resolução Espacial
B01	Coastal / Aerosol	430 - 450	30m
B02	Blue (Azul)	450 - 510	
B03	Green (Verde)	530 - 590	
B04	Red (Vermelho)	640 - 670	
B05	NIR (Infravermelho Próximo)	850 - 880	
B06	Shortwave Infrared-1	1570 - 1650	
B07	Shortwave Infrared-2	2110 - 2290	
B08	Pancromática	500 - 680	15m
B09	Cirrus	1360 - 1380	30m
B10 T1	Termal	10600 - 11190	30m*
B11 T1	Termal	11500 - 12510	

* Imagem adquirida com 100m, mas reamostrada para 30m.

A Figura 9 a seguir ilustra a composição colorida natural (RGB - cor verdadeira) do *Landsat 8*, através da combinação das bandas 4, 3 e 2. O enfoque dado na imagem refere-se ao município de Ribeirão Preto, datado em 01/07/2017, em escala 1:40.000.



Figura 9. Imagem do satélite *Landsat 8* da região de Ribeirão Preto - 01/07/2017 (USGS, 2017).

Já a missão *Sentinel 2*, produto de uma colaboração entre a Comissão Europeia e a Agência Nacional Europeia (ESA), disponibiliza a cada 5 dias (tempo de revisita considerando os dois satélites apresentados a seguir), imagens com resolução espacial de 10m (no visível). A missão contempla os satélites *Sentinel 2A* e *Sentinel 2B*, que são idênticos, diferenciando-se somente em relação à órbita em que trafegam e suas datas de lançamento: o *Sentinel 2A* foi lançado em 23 de junho de 2015, enquanto o *Sentinel 2B* teve seu lançamento somente em 7 de

março de 2017 (ESA, 2015). A Tabela 2 abaixo resume algumas informações pertinentes acerca de suas bandas espectrais.

Tabela 2. Principais características dos satélites *Sentinel 2A* e *Sentinel 2B* (ESA, 2015).

Nº da Banda	Nome da Banda	Comprimento de Onda Central (nm)	Resolução Espacial
B02	Blue (Azul)	490	10m
B03	Green (Verde)	560	
B04	Red (Vermelho)	665	
B08	NIR (Infravermelho Próximo)	842	
B05	Red Edge 1	705	20m
B06	Red Edge 2	740	
B07	Red Edge 3	783	
B08A	Red Edge 4	865	
B11	Swir 1	1610	
B12	Swir 2	2190	60m
B01	Aerossol	443	
B09	Water Vapor	940	
B10	Cirrus	1375	

A composição RGB é, portanto, também dada pela composição das bandas 04, 03 e 02, respectivamente, retornando uma imagem colorida capaz de nos fornecer informações básicas para o mapeamento de uso e ocupação da terra, por exemplo, a fim de obter características categóricas da vegetação e poder tirar conclusões acerca de modelos de risco de incêndios. A Figura 10 traz um recorte de uma imagem do *Sentinel 2A* com enfoque para a região urbanizada de Ribeirão Preto, datada de 24/06/2017, em escala 1:40.000.

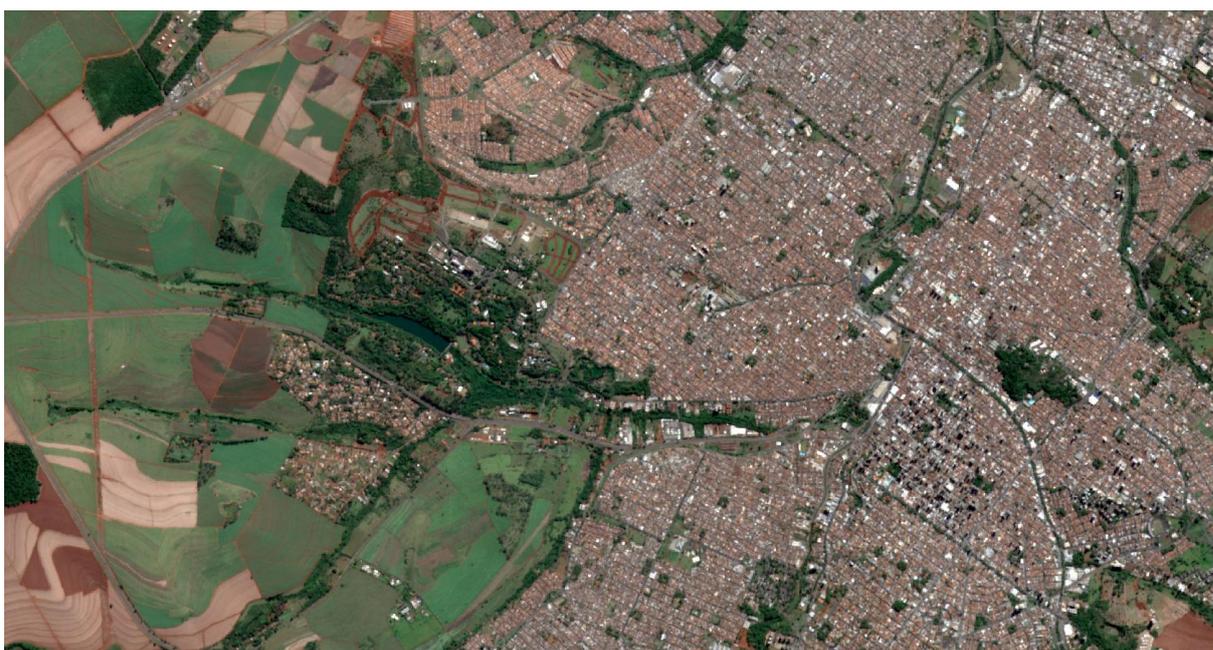


Figura 10. Imagem do satélite *Sentinel 2A* da região de Ribeirão Preto - 24/06/2017 (ESA, 2017).

2.2.2 Modelos digitais de elevação

Além de fornecer imagens multiespectrais da Terra, o sensoriamento remoto também é capaz de gerar informações a partir de imagens de relevo, também chamadas de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Os MDEs representam fontes para o conhecimento do relevo da superfície terrestre, permitindo a derivação de informações sobre a declividade, exposição solar e mapeamento da rede de drenagem de áreas extensas (LANDAU; GUIMARÃES, 2011). O ASTER (NASA - *National Aeronautics and Space Administration*) e SRTM (USGS - *United States Geological Survey*) são exemplos de produtos obtidos por meio de diferentes técnicas de sensoriamento remoto. O ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo do satélite Terra, representa um sensor capaz de adquirir pares estereoscópicos para quase todo o globo terrestre (entre as latitudes 83° S e 83° N), com resolução espacial de aproximadamente 30m. Já a missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), primeiramente lançada em 2000, objetivou gerar um modelo digital de elevação de 80% do Globo terrestre (entre as latitudes 56°S e 60°N), por meio de interferometria por sensoriamento remoto operante na faixa de microondas (RABUS et al., 2003 apud LANDAU; GUIMARÃES, 2011), com resolução espacial de aproximadamente 90m. Entretanto, com o seu desenvolvimento, desde 2014 já estão disponíveis imagens para todo o globo com resolução espacial de 30m.

O projeto TOPODATA, coordenado pelo INPE, é um produto derivado da missão SRTM. Lançado em agosto de 2008, o projeto tem como objetivo fornecer dados das imagens SRTM com melhorias substanciais através da remoção das falhas; redução de artefatos; e distribuição da aleatoriedade (VALERIANO, 2005). Uma de suas principais atribuições está relacionada à geração de dados de declividade, importante para estudar a propagação do fogo, como veremos no Item 2.3.3.1.

2.3 Índices de perigo de incêndio

De acordo com Ferreira (2010) os índices de perigo de incêndio são números que refletem, antecipadamente, a probabilidade de ocorrer um incêndio, assim como a facilidade do mesmo se propagar, de acordo com as condições atmosféricas do dia ou de um conjunto de dias. Onigemo (2007) ainda ressalta que a realização de estudos para a avaliação do risco de incêndio constitui a melhor possibilidade para a salvaguarda de vidas humanas, propriedades e recursos naturais. Sendo assim, o conhecimento destes índices é fundamental dentro de um plano de prevenção e combate a incêndios, pois permite a previsão das condições de perigo,

possibilitando a adoção de medidas preventivas em bases mais eficientes e econômicas (FERREIRA, 2010).

A ocorrência de um incêndio em determinado local depende de uma série de variáveis, relacionadas, entre outros aspectos, às características meteorológicas, topográficas e à combustibilidade (FERREIRA, 2010). E este grande número de fatores faz com que hajam diversas metodologias de cálculo e análise de risco de incêndios. Chuvieco e Congalton (1989) por exemplo, indicam que os principais fatores incluídos nos modelos de cálculo de risco de incêndio são a vegetação, a elevação, o declive, a exposição solar, o histórico de incêndios e dados meteorológicos. Já Ferraz e Vettorazzi (1998), por sua vez desenvolveram uma metodologia que além destes fatores, também considerou a vizinhança da área de estudo em um raio de 50 metros e a rede viária do local. Em outro trabalho, Salas e Chuvieco (1994) ainda levaram em consideração a distância da área de estudo com as redes de drenagem, classificando tais regiões como ‘sob influência’ ou ‘sem influência’ da umidade. Estes são apenas alguns exemplos de variações que este tipo de cálculo vem sofrendo ao longo do tempo, com cada vez mais variáveis a serem consideradas e, portanto, com expectativa de confiabilidade cada vez maior nos modelos desenvolvidos.

Entretanto, também é observada a desconsideração do fator temporal nestes estudos. Neste trabalho, foi assumido que o comportamento do fogo, principalmente no que diz respeito à sua origem e forma de propagação, possui variações consideráveis ao longo das diferentes estações do ano, e que, portanto, é imprescindível levar em consideração o fator tempo em estudos deste tipo. Tal alteração pode ser representada por variáveis como a precipitação e a incidência de raios, que possuem nítida variação mensal, de acordo com as características climáticas de cada momento do ano.

2.3.1 Índices de perigo de incêndio utilizados no mundo

Os países mais desenvolvidos possuem diversos índices de perigo de incêndio, cujos estudos foram iniciados no começo do século. Contudo, nem todos os índices podem ser aplicados no Brasil devido as suas particularidades climáticas. A maioria dos índices de perigo de incêndio utilizados ao redor do mundo hoje são embasados pelas variáveis climatológicas. Abaixo encontram-se alguns deles:

- Índice de Angstron:

Desenvolvido na Suécia, é um índice não cumulativo que se baseia na temperatura e umidade relativa do ar, ambos medidos diariamente às 13h00. Apresenta a seguinte equação:

$$B = 0,05H - 0,1 (T - 27) \quad (1)$$

Onde:

B = Índice de Angstron

H = Umidade relativa do ar em %

T = Temperatura do ar em °C

É constatado risco de incêndio para valores de “B” menores que 2,5, ou seja, nesse caso, as condições atmosféricas do dia estarão favoráveis à ocorrência de incêndios.

- Índice Logarítmico de Telicyn:

Desenvolvido na ex-União Soviética, este índice tem como variáveis as temperaturas do ar e do ponto de orvalho, ambas medidas às 13h00. É um índice cumulativo, isto é, o seu valor aumenta gradativamente, como realmente acontece com as condições de risco de incêndio, até que a ocorrência de uma chuva o reduza a zero, recomeçando um novo ciclo. A sua equação é a seguinte:

$$I = \sum_{i=1}^n \log(t_i - r_i) \quad (2)$$

Onde:

I = Índice de Telicyn

t = Temperatura do ar em °C

r = Temperatura do ponto de orvalho em °C

Restrição do índice: sempre que ocorrer uma precipitação igual ou superior a 2,5 mm, deve-se abandonar a somatória e recomeçar o cálculo no dia seguinte, ou quando a chuva cessar. No (s) dia (s) de chuva o índice é igual a zero. Já que o índice é cumulativo, sua interpretação é feita de acordo com a Tabela 3 abaixo.

Tabela 3. Escala de perigo de incêndio do índice logarítmico de Telicyn.

Valor de I	Grau de Perigo
≤ 2,0	Nenhum
2,1 a 3,5	Pequeno
3,6 a 5,0	Médio
> 5,0	Alto

- Índice de Nesterov:

Desenvolvido na ex-União Soviética e aperfeiçoado na Polônia, este índice tem como variáveis a temperatura e o déficit de saturação do ar, ambos medidos diariamente às 13h00. O índice de Nesterov, que também é cumulativo, possui a seguinte equação básica:

$$G = \sum_{i=1}^n d_i - t_i \quad (3)$$

Onde:

G = Índice de Nesterov

d = Déficit de saturação do ar em milibares

t = Temperatura do ar em °C

O déficit de saturação do ar (d) é igual à diferença entre a pressão máxima de vapor d'água e a pressão real de vapor d'água, podendo ser calculado por meio da seguinte expressão:

$$d = E \left(1 - \frac{H}{100} \right) \quad (4)$$

Onde:

d = Déficit de saturação do ar em milibares

E = Pressão máxima de vapor d'água em milibares

H = Umidade relativa do ar em %

No índice de Nesterov, a continuidade da somatória é limitada pela ocorrência de restrições elencadas na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4. Restrições à somatória de Nesterov, de acordo com a quantidade de chuva do dia.

Chuva do dia (em mm)	Modificação no cálculo
≤ 2,0	Nenhuma
2,1 a 5,0	Abater 25% no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
5,1 a 8,0	Abater 50% no valor de G calculado na véspera e somar (d.t) do dia.
8,1 a 10,0	Abandonar a somatória anterior e recomeçar novo cálculo, isto é, G = (d.t) do dia.
> 10,0	Interromper o cálculo (G = 0), recomeçando a somatória no dia seguinte ou quando a chuva cessar.

A interpretação do grau de risco estimado pelo índice é feita por meio de uma escala de perigo, apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Escala de perigo de incêndio do índice de Nesterov.

Valor de G	Grau de Perigo
≤ 300	Nenhum
301 a 500	Pequeno
501 a 1000	Médio
1001 a 4000	Alto
> 4000	Muito Alto

- Fórmula de Monte Alegre:

Este índice, desenvolvido a partir de dados da região central do estado do Paraná, também é cumulativo e tem como único parâmetro a umidade relativa do ar, medida às 13h00. Seu cálculo é dado pela equação:

$$FMA = \sum_{i=1}^n (100/H_i) \quad (5)$$

Onde:

FMA = Fórmula de Monte Alegre

H = Umidade relativa do ar (%)

n = Número de dias sem chuva

Por ser cumulativo, o índice possui restrições de aplicação, que são apresentadas na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6. Restrições à fórmula de Monte Alegre, de acordo com a quantidade de chuva do dia.

Chuva do dia (em mm)	Modificação no cálculo
≤ 2,4	Nenhuma
2,5 a 4,9	- 30% na FMA calculada na véspera + (100/H) do dia.
5,0 a 9,9	- 60% na FMA calculada na véspera + (100/H) do dia.
10,0 a 12,9	- 80% na FMA calculada na véspera + (100/H) do dia.
> 12,9	Parar o cálculo (FMA=0) e recomeçar a soma no dia seguinte.

A interpretação do grau de risco trazido pela FMA também é feita por meio de uma escala de perigo, apresentada na Tabela 7.

Tabela 7. Escala de perigo de incêndio da fórmula de Monte Alegre.

Valor de FMA	Grau de Perigo
≤ 1,0	Nenhum
1,1 a 3,0	Pequeno
3,1 a 8,0	Médio
8,1 a 20,0	Alto
> 20,0	Muito alto

Fonte: BATISTA; SOARES, 2002 apud ONIGEMO, 2007

A seguir é apresentado alguns índices capazes de indicar a suscetibilidade do meio à ocorrência de um incêndio, tanto em termos da origem, ou ignição do foco, quanto em relação à sua forma de propagação, levando em consideração outras variáveis além das climáticas.

2.3.2 Indicadores de ignição do fogo

Os indicadores com capacidade de ignição são aqueles capazes de influenciar na origem do foco em si, devido à uma ação antrópica ou natural. A formação do foco, como já explicado no Item 2.1.1, é produto da reação química entre um combustível, um comburente e uma fonte de calor. Alguns fatores físicos e biológicos servem como facilitadores ou supressores deste processo, e serão apresentados abaixo.

2.3.2.1 Precipitação

Os dados meteorológicos estão entre as variáveis mais importantes no que diz respeito à predição e ocorrência de incêndios. Aguado e Camia (1998) ressaltam que o clima exerce um fator de controle predominante na frequência e ocorrência de incêndios porque determina a sucessão de períodos secos e úmidos e, conseqüentemente, o acúmulo de biomassa, a carga de combustíveis e o seu estado hídrico.

Índices meteorológicos são considerados indicadores dinâmicos devido à sua variabilidade temporal que os tornam índices de períodos curtos, de poucos dias, capazes de calcular a probabilidade de ignição de um foco. A temperatura, a umidade e a precipitação, por exemplo, são indicadores meteorológicos com forte influência na ignição do fogo devido à sua capacidade de definir o estado da cobertura vegetal daquele momento (AGUADO; CAMIA, 1998). Além das fases de ignição e propagação, é válido dizer que os índices meteorológicos também são muitas vezes responsáveis pela supressão do fogo, resultado de casos de precipitação e umidade extremas.

White e Ribeiro (2011) analisaram por meio de seus estudos a influência da precipitação na ocorrência de incêndios florestais e concluíram que eles estão sempre associados a períodos sem chuva. Existe uma forte correlação entre ocorrência de grandes incêndios e prolongados períodos de seca. Longos períodos de estiagem afetam o potencial de propagação dos incêndios de diversas maneiras, principalmente pela secagem progressiva do material combustível morto, podendo, inclusive, afetar o teor de umidade da vegetação verde. Isso aumenta a probabilidade de ignição e a facilidade de propagação do incêndio (SOARES e BATISTA, 2007 apud WHITE; RIBEIRO, 2011). Onigemo (2007) ressalta que é importante levar em consideração não apenas a quantidade de chuva, mas também a sua distribuição estacional. Em uma região

havendo distribuição uniforme de chuva, durante todo o ano e sem uma estação seca definida, o potencial de ocorrência e propagação de incêndios é bem menor do que em uma região onde ocorrem chuvas concentradas em alguns meses, com longos períodos de seca no restante do ano. Portanto, a distribuição da precipitação pluviométrica é fator importante na definição do início, término e duração das estações de alto potencial de incêndio (SCHOEDER; BUCK, 1970 apud ONIGEMO, 2007).

2.3.2.2 Índices de vegetação

A cobertura vegetal é responsável pelo fornecimento do material combustível para queima. As propriedades dos combustíveis variam de acordo com o tipo de vegetação, podendo causar alterações no desenvolvimento de incêndios (ONIGEMO, 2007). Uma tentativa que vem sendo implementada mundialmente para reconhecer estas diferenças é o desenvolvimento de sistemas de predição de risco de incêndio por meio de sensoriamento remoto, que estima o estado da vegetação em grandes áreas (HARDY; BURGAN, 1999 apud ONIGEMO, 2007).

Os Índices de Vegetação (I.V.) são modelos matemáticos de bandas espectrais desenvolvidos para avaliar a cobertura vegetal e diagnosticar o índice de área foliar, biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade; e têm sido utilizados com sucesso para o monitoramento de mudanças na vegetação em escala continental, regional e global (MARCUSI et al., 2010). O cálculo é feito normalmente a partir das bandas do vermelho e infravermelho próximo, em uma equação que pode ser aplicada diretamente pelo SIG. As bandas das imagens de satélite são compostas por pixels, que por sua vez, são transformados diretamente pelas equações, ressaltando determinados aspectos inerentes a cada índice (ROSENDO; ROSA 2005 apud MARCUSI et al., 2010). A determinação e a diferenciação da vegetação pelos métodos de sensoriamento remoto são possíveis no intervalo de 0,4 até 2,5 μm , pois neste intervalo as folhas são caracterizadas por comportamentos específicos de reflexão, absorção e transmissão, como pode ser observado na Figura 11.

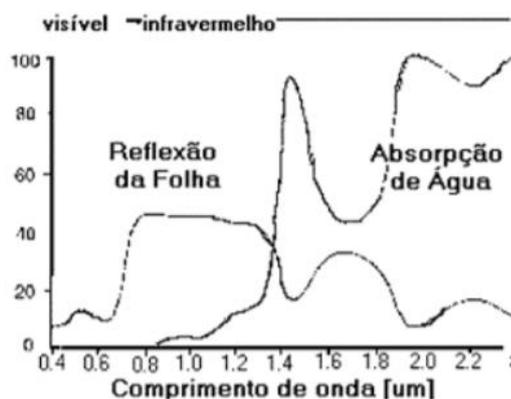


Figura 11. Refletividade, absorvidade e transmissividade em uma folha verde para a radiação no infravermelho próximo (IVP) e na banda visível (V) (SANTOS, 1999 apud ONIGEMO, 2007).

Dentre os principais índices capazes de analisar a vegetação destacam-se o RVI (Índice de Vegetação de Razão) e o NDVI (Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada). O RVI baseia-se na aplicação básica da razão entre as bandas do vermelho e infravermelho. Entretanto, Barbosa (2006) ressalta que a aplicação prática desse índice exige certos cuidados, porque devido à alta absorção do vermelho pela vegetação, a refletância se torna mínima, não sendo aconselhável o uso deste índice em áreas com vegetação esparsa. Já o NDVI é um índice mais sensível à esta vegetação esparsa quando comparado ao RVI (SANTOS, 1998). Isto o torna capaz de salientar com mais facilidade o sinal da vegetação fotossinteticamente ativa mesmo em condições de pouca biomassa. Suas aplicações vão desde o monitoramento do uso e ocupação da terra, à geração de indicadores de produtividade em culturas agrícolas.

O SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo) é uma técnica de transformação criada com o objetivo de minimizar a influência do brilho do solo em índice de vegetação (HUETE, 1988). Pode ser considerado um primo do NDVI, diferenciando-se do mesmo por considerar os efeitos do solo exposto nas imagens analisadas quando a superfície não está completamente coberta pela vegetação (BORATTO; GOMIDE, 2013).

Alguns estudos encontrados na bibliografia disponível buscaram analisar as relações entre os índices de vegetação e a suscetibilidade a incêndios. Constata-se que ainda não há interpretação unânime por parte da comunidade científica a respeito da proporcionalidade dos índices de vegetação e o perigo de incêndio, fato que pode ser explicado pelas diferentes propriedades dos combustíveis em diferentes tipos de vegetação. Grande parte dos autores associam os índices de vegetação ao seu respectivo teor de umidade. A proporção deste fator com o perigo de incêndio pode ser simplesmente associada à quantidade de água disponível na mesma e, portanto, ao seu respectivo vigor. Nesse sentido, quanto maior o índice de vegetação, e conseqüentemente maior o vigor da vegetação, maior a disponibilidade de água e, portanto, menor a probabilidade de ignição de um incêndio. Entretanto, como estes índices fazem uso da banda do infravermelho próximo, região do espectro eletromagnético que apresenta grande potencial de absorção pela água (Figura 11), os valores do índice tendem a diminuir em regiões com presença de umidade, invertendo a proporção trazida anteriormente.

Onigemo (2007) avaliou esta interação a partir do NDVI em áreas de gramíneas no Pantanal mato-grossense através do teor de umidade presente no solo. Segundo o autor a umidade dos combustíveis é uma das características mais importantes no controle do risco de incêndios pois o alto conteúdo de umidade aumenta o calor necessário para queimar os combustíveis, já que essa energia é usada para evaporar a água. Além disso, os valores altos de umidade do combustível insinuam uma propagação lenta, porque parte deste calor liberado pela

frente do fogo é usado para absorver água de combustíveis adjacentes (CHUVIECO et al., 2002 apud ONIGEMO 2007). Em outros trabalhos, como no de Silveira et al. (2013) foi feita uma relação de NDVI e a quantidade de biomassa disponível para combustão. Nesse sentido, áreas com índices de vegetação mais altos foram consideradas mais suscetíveis aos incêndios por possuírem maior carga de combustíveis.

Nos exemplos acima, as associações do índice de vegetação (NDVI no caso) foram feitas em regiões de gramíneas e florestas densas, tornando a interpretação do índice parcial no que diz respeito à relação com a forma de ignição e propagação de incêndios nestes tipos de vegetação. Uma outra abordagem deve ser dada quando se trata da análise da vegetação em áreas de culturas agrícolas, como a cana-de-açúcar. Há muitos estudos que avaliam as potencialidades do uso de índices de vegetação para avaliar a produtividade do cultivo de cana-de-açúcar em termos de biomassa, entretanto são raros os trabalhos que façam algum tipo de associação direta desta biomassa com a suscetibilidade à ocorrência de incêndios.

Como já tratado no Item 2.1.4, a questão da queima da cana-de-açúcar ainda é um assunto vigente, portanto o uso de índices de vegetação em seus diferentes estágios de crescimento pode servir como um indicador espacial e temporal de suscetibilidade a incêndios. Ao contrário do que alguns autores propõem para a análise do índice para outros tipos de vegetação, associando alta biomassa com alta suscetibilidade ao fogo, entende-se que no caso da cana-de-açúcar a proporcionalidade do NDVI deve ser dada através da quantidade de material energético (combustível) disponível para queima, principalmente na fase de maturação. Neste caso, não se trata especificamente do teor de biomassa em si, pois tratando desta forma canaviais com maior vigor possuem maior biomassa, maior NDVI e, portanto, seriam mais suscetíveis aos incêndios; mas sim de um componente ainda mais suscetível à ignição do fogo, que além de possuir grande carga energética, sofre muitas vezes com a queima proposital, passível de se descontrolar e se tornar um incêndio: a chamada palha da cana-de-açúcar.

Esta palha nada mais é do que os resquícios e impurezas provenientes do desenvolvimento da cana-de-açúcar. A queima da palha pré-colheita é considerada uma forma de reduzir os gastos relacionados à mão-de-obra necessária para a limpeza dos talhões, além de evitar pragas e animais peçonhentos. Entretanto, também são diversos os prejuízos decorrentes deste processo, que vão desde o favorecimento de erosões e a emissão de poluentes ao pior aproveitamento da cana do ponto de vista energético (ANTUNES; AZANIA; AZANIA, 2017). Sua composição engloba basicamente ponteiros e folhas da cana-de-açúcar; quimicamente falando, a palha da cana é composta por holocelulose (72,9%), lignina total (18,9%), cinzas (4,7%) e extrativos (3,5%) (LINO, 2015). Dessa forma, o tecido vegetal da palha de cana

apresenta os mesmos componentes químicos que o bagaço ou a madeira (SANTOS et al., 2012), tornando-a altamente combustível.

A Figura 12 a seguir, retirada do trabalho de Ramme, Lamparelli e Rocha (2010) ressalta a relação entre os índices de vegetação (NDVI, no caso) e os estágios de desenvolvimento da cana. A figura apresenta um dos resultados encontrados pelos autores para duas microrregiões estudadas (vermelho e azul), ambas correspondentes à safra 2005/2006, com mesmo número de corte.

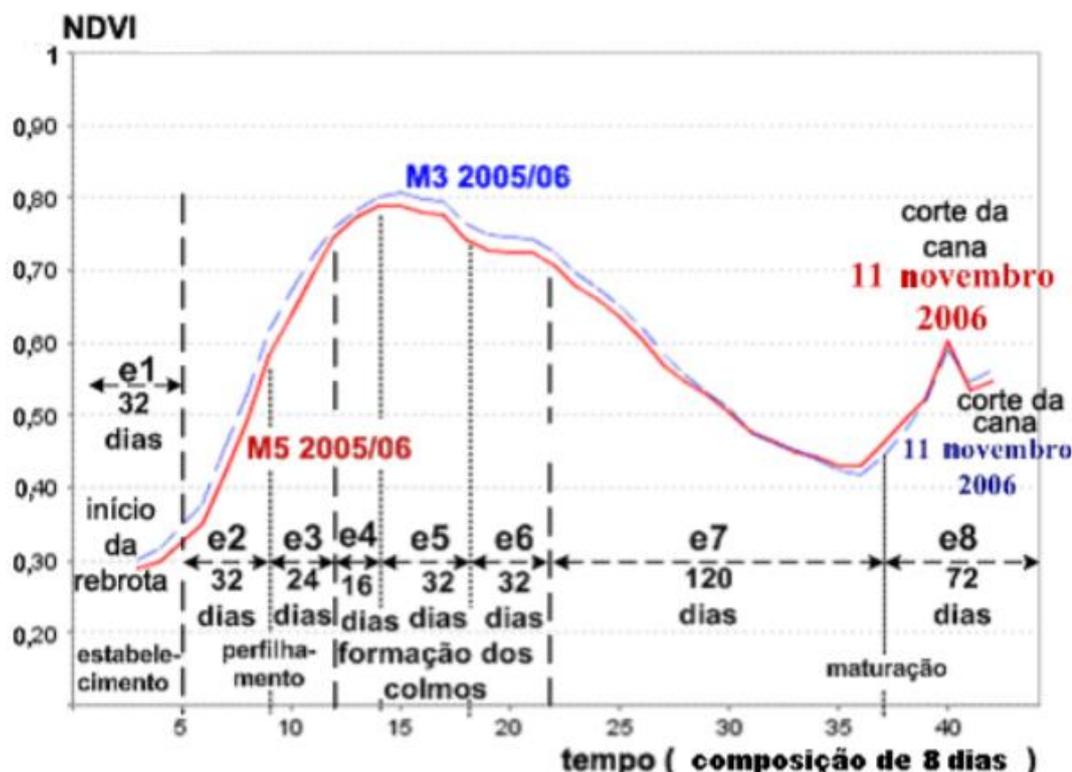


Figura 12. Perfil temporal do NDVI nos estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar (RAMME; LAMPARELLI; ROCHA, 2010)

Observa-se que no período de maturação, quando teoricamente a cana-de-açúcar possui maior quantidade de palha por ter atingido o ápice de seu desenvolvimento até a colheita (e, portanto, maior carga energética), os valores de NDVI são menores. Nesta linha de raciocínio, os trabalhos de Ramme, Lamparelli e Rocha (2010) comprovam a necessidade de se atribuir maiores valores de suscetibilidade a incêndios quando o NDVI for baixo, mas não 0, pois nestes casos indicarão solo exposto ou, em casos ademais às culturas agrícolas, podem indicar fragmentos de urbanização.

2.3.2.3 *Uso e ocupação da terra*

De acordo com Batista (2000), a caracterização criteriosa das atividades de uso e ocupação da terra pelo homem, relacionando-as com o potencial de produção de fontes de fogo

é fator fundamental para o zoneamento de risco de incêndios. Já Ribeiro (2008) ressalta que o conhecimento sobre o uso da terra é essencial para a compreensão do nível de riscos aos quais os sistemas estão sujeitos, bem como a forma mais adequada de seu manejo.

O uso e ocupação da terra pode receber diversas abordagens diferentes. Uma delas faz referência à metodologia proposta por Ferraz e Vettorazzi (1998), que se relaciona com a diferenciação de usos em si, dando pesos para cada classe de acordo com a influência do homem em cada uma delas e seus respectivos graus de combustibilidade. No caso de áreas de cana-de-açúcar e pastagem por exemplo, o referido grau é superior devido às características físicas deste tipo de uso. A primeira oferece grande risco devido à prática de queimadas e movimentação de pessoas e veículos. Já as pastagens podem ser consideradas áreas de risco pois apresentam vegetação rasteira de alta combustibilidade (FERRAZ; VETTORAZZI, 1998). Outra abordagem, utilizada por Chuvieco e Congalton (1989) vai um pouco além. Nesta outra aproximação há uma especificação dos tipos vegetacionais quanto à sua estrutura, sua localização e sua combustibilidade. No contexto do trabalho de Chuvieco e Congalton (1989) houve uma diferenciação dos pesos atribuídos a cada espécie de vegetação presente na área de estudo de acordo com seus respectivos graus de adensamento e combustão, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8. Método de análise da vegetação proposto por Chuvieco e Congalton (1989).

Classes Originais	Grupos de Risco de Incêndio	Coefficiente
Pinheiro Denso	Alto	0
Pinheiro Médio	Alto	0
Pinheiro Esparso + Arbusto	Médio	1
Arbusto Denso	Médio	1
Arbusto Médio	Médio	1
Arbusto Esparso	Baixo	2
Amendoeiras	Baixo	2
Vinhedos	Baixo	2
Laranjeiras	Baixo	2

Dentre os diferentes tipos de uso e ocupação da terra, no que diz respeito à suscetibilidade a incêndios, a cana-de-açúcar, as pastagens e plantações de eucalipto merecem atenção especial. A questão da cana já foi amplamente discutida neste trabalho, e a atenção dada a ela está relacionada às suas características de combustibilidade da vegetação (principalmente da sua palha), intensa movimentação de trabalhadores e máquinas, além de seu histórico processo de queima. A pastagem é trazida por diversos autores como um fator de risco extremo à suscetibilidade a incêndios em razão do uso do fogo para sua formação e renovação; sua localização, normalmente às margens de estradas e florestas (RIBEIRO; SOARES; BEPLER,

2012); além da maior presença de gramíneas, que possuem alta inflamabilidade (KOPROSKI et al., 2011). Por fim, as plantações de eucalipto também são consideradas de risco alto por muitos autores devido ao histórico e composição deste tipo de vegetação. Em entrevista à BBC (*British Broadcasting Corporation*), o engenheiro zootécnico português João Camargo explicou que o eucalipto é uma árvore proveniente de regiões em que as queimadas são muito comuns, e que, portanto, ele aprendeu a usar os incêndios para se expandir, tomando o lugar da natureza que foi destruída pelo fogo. Ainda segundo o entrevistado, “*um dos principais problemas do eucalipto é que ele arde muito rápido e é muito resistente ao fogo. Ele continua a sobreviver durante o incêndio e graças ao calor, a sua casca se solta do tronco, se transformando em condutor das chamas*”. Este poder de gerar e propagar incêndios levou a espécie a receber o apelido de “árvore de gasolina” (FILHO, 2017).

2.3.2.4 Distância da malha viária

Qualquer fator que esteja relacionado com a proximidade e interação do homem merece atenção especial quanto à suscetibilidade de ocorrência de incêndio. Um plano de informação que tenta quantificar esta interação homem e meio é o de distância de estradas. Segundo Chuvieco e Congalton (1989) dois fatores importantes devem ser considerados neste aspecto de estradas: primeiramente, estradas podem servir de “bloqueadores de incêndios”, servindo de caminhos para a supressão do fogo. Neste sentido elas podem ser consideradas fatores que reduzem a probabilidade de propagação do fogo. Entretanto, estradas também são importantes rotas para acampamentos e caminhada. Neste contexto elas se tornam agentes de influência nos modelos de suscetibilidade a incêndios devido à intensa atividade humana presente. De acordo com Ferraz e Vetorazzi (1998), o entorno de estradas e carreadores possuem um grau de risco de incêndios significativo pois envolve o acesso de pessoas e veículos na região, que podem ocasionar incêndios criminosos; prática de cultos religiosos; incêndios causados por cigarros; prática de pequenas fogueiras, além de outras ocorrências. Desse modo, considerou-se que estes meios de acesso têm uma área de influência em torno de si, na qual a vegetação existente sofre risco de ignição de incêndio. Além disso, parte dos pequenos focos que ocorrem no entorno de estradas tem suas causas relacionadas ao lançamento de bitucas de cigarro pelos motoristas (ANDRADE; ARAÚJO; VELLOSO, 2009). Ainda que tais focos têm grandes chances de não vir a se tornar um incêndio de maiores proporções devido à usual ausência de meios de propagação nestes tipos de locais, esta possibilidade não deve ser descartada, principalmente no que diz respeito a estradas com áreas de vegetação nativa em seu entorno.

2.3.2.5 Distância de corpos d'água

Assim como o indicador de distância da malha viária, a distância de corpos d'água também é trazida e analisada de diferentes maneiras entre autores do tema. Ribeiro et al. (2008), relatam esta dualidade ao afirmar que a proximidade com corpos de água pode ser positiva ou negativa, pois pode servir como barreira à propagação do fogo, bem como receber visitação humana, seja para recreação, pesca ou realização de rituais religiosos, favorecendo a ocorrência de incêndios. Ribeiro, Soares e Beppler (2012) indicam em seu trabalho que assim como ocorre com as estradas e rodovias, os rios também possuem alto grau de risco de incêndio em suas margens devido à presença de vegetação que podem se tornar suscetíveis à entrada do fogo pela influência fluvial. Por outro lado, Forman e Collinge (1997) também ressaltaram que os corpos d'água podem ser considerados uma barreira à propagação do fogo, além é claro do fator umidade, mais alto no entorno dos corpos d'água, o que diminui o risco de ignição do fogo.

2.3.2.6 Incidência de raios

A ocorrência de incêndio por incidência de raios é considerada, entre os indicadores naturais, aquela mais recorrente (FURB, 2015). Sendo assim, este se faz um indicador de importância significativa para se avaliar a suscetibilidade a incêndios em determinada região. O ELAT (Grupo de Eletricidade Atmosférica – INPE) explica que os incêndios produzidos por relâmpagos podem produzir uma reciclagem dos nutrientes do solo, favorecendo a perpetuação de determinadas espécies de vegetais e animais. O grupo estima que por ano, ocorra cerca de 100 mil incêndios no mundo produzidos por relâmpagos. Só nos Estados Unidos, a estimativa é de que, anualmente, 15 mil incêndios sejam causados por raios, que além de afetar o solo, causam danos materiais a propriedades, estimados em cerca de 200 milhões de dólares a cada ano.

No que diz respeito aos incêndios florestais, o ELAT afirma que as árvores funcionam como ótimos receptores de descargas devido ao seu porte usualmente mais alto e à seiva presente no interior de seu tronco que é melhor condutor do que o ar. A combinação destes fatores atrelada à sua disposição no espaço, normalmente de forma densa, faz com que um princípio de fogo ocasionado por um raio se alastre e tome as proporções de um incêndio.

Além disso, não são raros os casos de incêndios em canaviais decorrentes dos raios. De acordo com o ELAT, o município de Ribeirão Preto recebe cerca de 7,27 descargas por km² em um ano, ocupando a 453ª posição do ranking estadual. Destes, grande parte ocorre nos canaviais da região devido à exposição da agricultura a este fenômeno (BRASILAGRO, 2015). Uma análise exploratória dentre os principais meios de divulgação de notícias aponta uma frequente

ocorrência de incêndios em canaviais onde os raios são considerados os principais suspeitos de ignição do fogo. Podemos citar casos em Ibitinga (SP), Ivinhema (MS), Nova Andradina (MS), Chapadão do Sul (MS), Pedro Afonso (TO), entre muitos outros, todas consideradas regiões com forte atuação de usinas de cana-de-açúcar.

2.3.3 Indicadores de propagação do fogo

Como já mencionado no Item 2.1.1 desta dissertação, para um incêndio ser considerado como tal, é preciso que o foco de calor ou as chamas propriamente ditas estejam fora do controle dos órgãos competentes. Para tanto, a propagação do fogo assume grande responsabilidade.

De acordo com Whelan (1995), os fatores que permitem a ignição vão também influenciar na propagação do fogo. Combustíveis mais arejados, por exemplo, que possuem maior disponibilidade de oxigênio, queimarão mais intensamente e se espalharão mais rapidamente, além de serem mais propensos a inflamar. Entretanto, segundo o autor, a tentativa de entender os fatores que regulam a propagação dos incêndios tem sido uma ativa e complexa área de pesquisa por décadas. Uma versão simplificada desta discussão é trazida na Tabela 9.

Tabela 9. Resumo dos fatores físicos que afetam na propagação do fogo (WHELAN, 1995).

Fator	Efeitos
Combustível	Determina a energia máxima disponível para o fogo; a disposição do combustível pode afetar na aeração, propagação vertical e horizontal; o tamanho da distribuição do combustível pode afetar na ignição; a composição química do combustível pode aumentar ou diminuir sua inflamabilidade.
Clima	Determina a produtividade da vegetação e, portanto, o nível de acúmulo de combustível.
Precipitação e Umidade	Aumenta a umidade do combustível que combinada com alta umidade relativa diminui a probabilidade de ignição, o nível de combustão e o nível de propagação.
Vento	Ocasiona na secagem do combustível; aumenta a disponibilidade de oxigênio para a combustão; pré-aquece e acende o combustível antes da frente; mudanças na direção do vento podem aumentar a frente de fogo.
Topografia	Provém variação no microclima; permite pré-aquecimento e ignição para queima do fogo; pode prover barreiras naturais; determina parcialmente a distribuição de comunidades de plantas de diferentes inflamabilidades.

Sendo assim, índices relacionados à topografia do meio, como a declividade, e outros relacionados ao clima, como a direção dos ventos, são importantes planos de informação capazes de influenciar no alastramento do fogo. Neste trabalho daremos enfoque a estes dois componentes devido à possibilidade de levantá-los e interpretá-los através dos sistemas de

informação geográficas. Abaixo explicaremos mais detalhadamente de que maneira tais fatores exercem influência no comportamento da chama.

2.3.3.1 Declividade

A declividade tem influência determinante na propagação dos incêndios, visto que, quanto maior o declive do terreno, maior é o efeito das colunas de convecção que aquecem a vegetação acima do incêndio, aumentando a velocidade de propagação no sentido ascendente (FERREIRA, 2010). Assim, segundo Ferreira (2010), o declive é um fator crítico, pois encostas íngremes facilitam a propagação do incêndio por pré-aquecimento por convecção e de ignição por ponto de contato. Ferraz e Vetorazzi (1998) resumem que áreas mais declivosas são consideradas de maior risco de incêndios devido a transferência de calor que é facilitada no sentido do aclave, aumentando a velocidade de propagação, como mostra a Figura 13 a seguir.

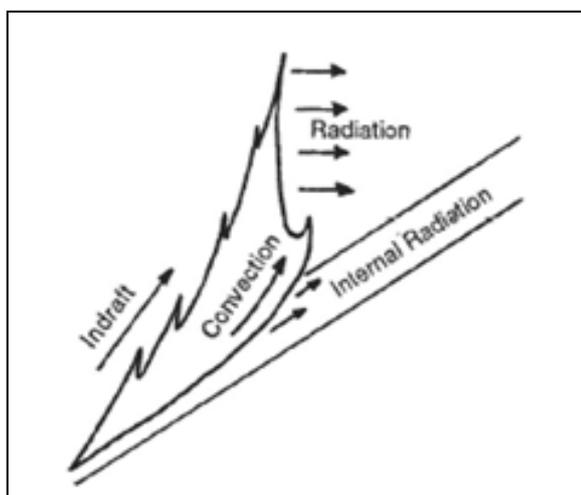


Figura 13. Influência da declividade no comportamento do fogo (WHELAN, 1995).

O mesmo argumento é trazido por Oliveira (2002), que indica que a inclinação do terreno está diretamente relacionada com a velocidade e a direção de propagação do fogo, devido ao aumento da temperatura do ar, que pré-aquece os combustíveis à frente do fogo, facilitando o seu avanço com maior velocidade no sentido do aclave.

Além disso, outro efeito importante da topografia é a sua interação com o microclima e a distribuição espacial de comunidades de plantas. Espera-se que o fogo no sentido ascendente se propague de forma mais rápida e intensa. Entretanto, há um grande número de fatores adicionais que interagem para confundir esta relação. A vegetação de ravinas ou barrancos, por exemplo, é bem diferente daquela encontrada em morros e colinas, sendo aquela talvez mais mesofítica, mais densa no dossel e, portanto, menos inflamável. Estas mudanças no fator de propagação que não se baseiam só na questão da forma de relevo em si, mas também no tipo

de vegetação que ele engloba são consideradas um grande desafio para aqueles que propõem modelos de propagação do fogo (WHELAN, 1995).

2.3.3.2 *Influência dos ventos*

Whelan (1995) faz duas considerações importantes acerca da influência dos ventos na propagação de incêndios. Segundo o autor, um dos principais efeitos do vento no fogo é o de prover mais oxigênio, aumentando seu grau de combustão. Além disso, os ventos são capazes de alterar o ângulo da chama, ocasionando a rápida propagação do fogo por radiação e convecção, como mostra a Figura 14 (WHELAN, 1995).

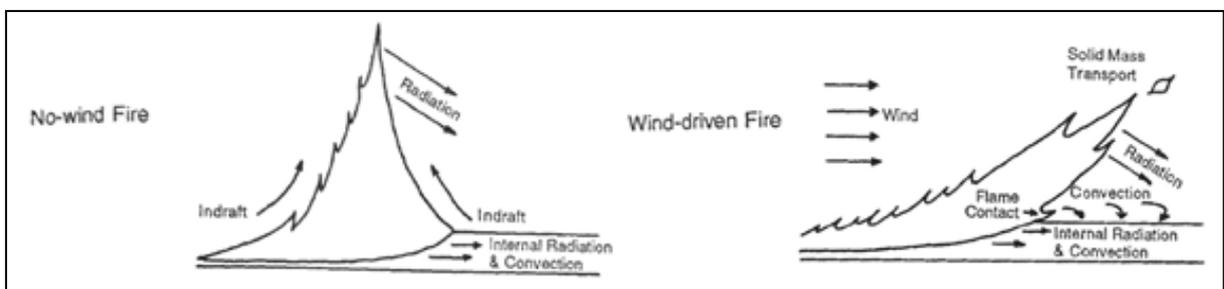


Figura 14. Influência do vento no comportamento do fogo (WHELAN, 1995). À esquerda, um exemplo de uma chama sem interferência do vento, à direita o comportamento da chama sob influência do vento.

Enquanto o vento é responsável pela oxigenação da combustão e, conseqüentemente, intensificação da queima, é também o responsável pelo arrastamento de faíscas que poderão provocar focos de incêndios a distâncias consideráveis e pela inclinação das chamas sobre outros combustíveis. Ou seja, em outras palavras, o vento aumenta a velocidade de propagação porque aporta o oxigênio para a combustão, transporta o ar aquecido, resseca os combustíveis e dispersa partículas em ignição (FREEDMAN, 1989 apud ONIGEMO, 2007).

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição da área de estudo

O município de Ribeirão Preto localiza-se na região nordeste do estado de São Paulo, distando aproximadamente 315km da capital paulista. Compreende as coordenadas 21°10'41”S e 47°48'24”O e é limítrofe aos municípios de Guatapar, a sul; Cravinhos, a sudeste; Jardinópolis, a norte; Serrana, a leste; Dumont, a oeste; Sertãozinho, a noroeste; e Brodowski, a nordeste (Figura 15). Possui 604.682 habitantes (IBGE, 2010) e área de 650,916 km (IBGE, 2016). O principal curso hídrico da cidade  um afluente do Rio Pardo, corta a mesma no sentido norte-sul e d nome ao município.

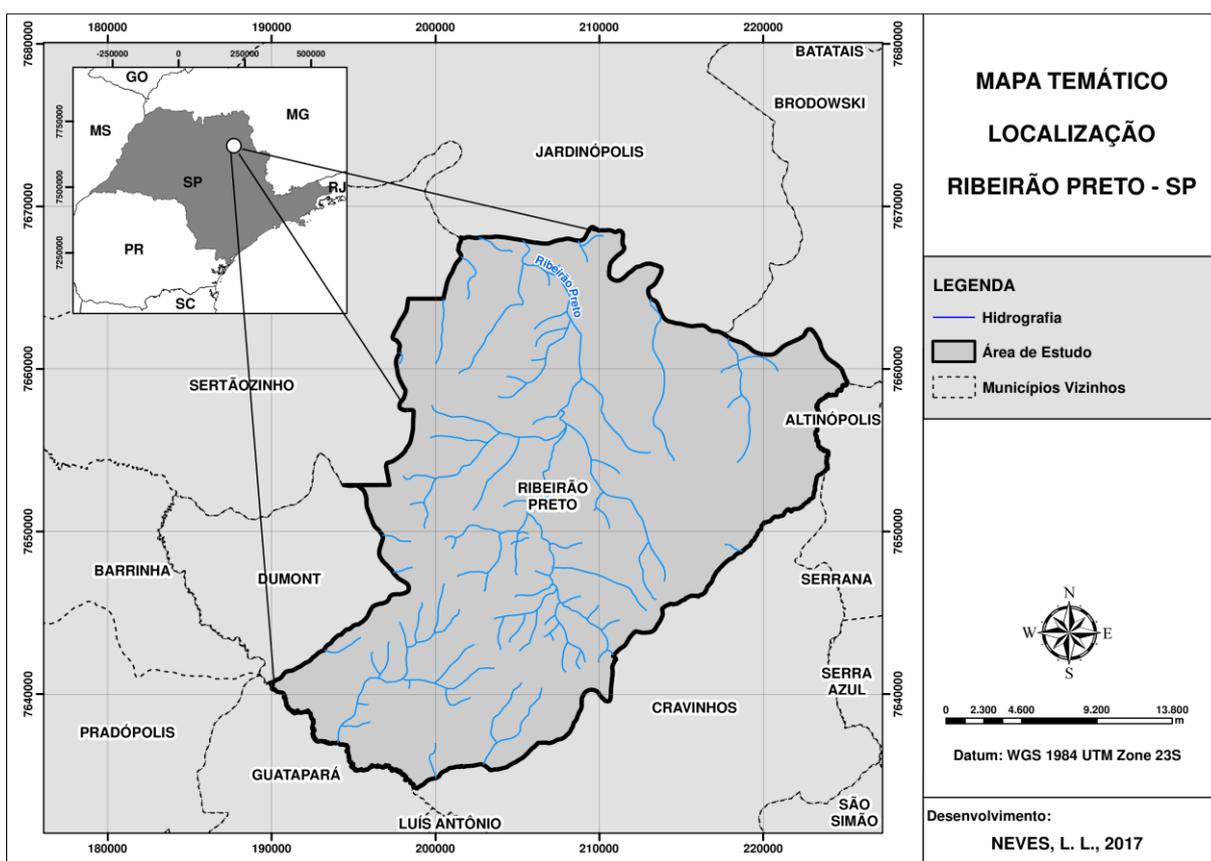


Figura 15. Mapa temático de localizao do município de Ribeir Preto – SP.

O clima da região  predominantemente tropical com ver chuvoso e inverso seco. As temperaturas mdias variam em 19C no inverno, que compreende os meses de junho a setembro, e 30C no ver, nos meses de dezembro a março. A precipitao pluviométrica média  de 1.426,80mm por ano, e a média anual da umidade relativa do ar  de 71% (Prefeitura Municipal de Ribeir Preto, 2010). A Tabela 10 a seguir mostra a média dos dados mensais de precipitao e temperatura para o município a partir de informaçoes obtidas junto ao CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas  Agricultura).

Tabela 10. Média dos dados climáticos mensais para o município de Ribeirão Preto – SP (Fonte: CEPAGRI).

Mês	Temp. Mínima	Temp. Máxima	Temp. Média	Precipitação
JAN	20,00	30,00	25,00	265,00
FEV	20,00	30,00	25,00	206,80
MAR	19,00	30,00	25,00	156,60
ABR	17,00	29,00	23,00	69,10
MAI	15,00	27,00	21,00	47,80
JUN	13,00	26,00	20,00	28,60
JUL	13,00	27,00	20,00	20,90
AGO	14,00	29,00	22,00	21,00
SET	16,00	30,00	23,00	51,90
OUT	18,00	31,00	25,00	128,80
NOV	19,00	30,00	24,00	168,50
DEZ	19,00	30,00	25,00	257,50

De acordo com o órgão, Ribeirão Preto se enquadra na classificação climática AW segundo a distribuição de Koeppen para o estado de São Paulo. Isto significa que, assim como boa parte da região nordeste do estado, o município é caracterizado pelo clima tropical chuvoso com inverno seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18°C. O mês mais seco tem precipitação inferior a 60mm e com período chuvoso que se atrasa para o outono.

No que diz respeito à topografia da região, o relevo da área de estudo é pouco declivoso, com baixa amplitude altimétrica, que varia entre 500m e 800m, aproximadamente (Figura 16).

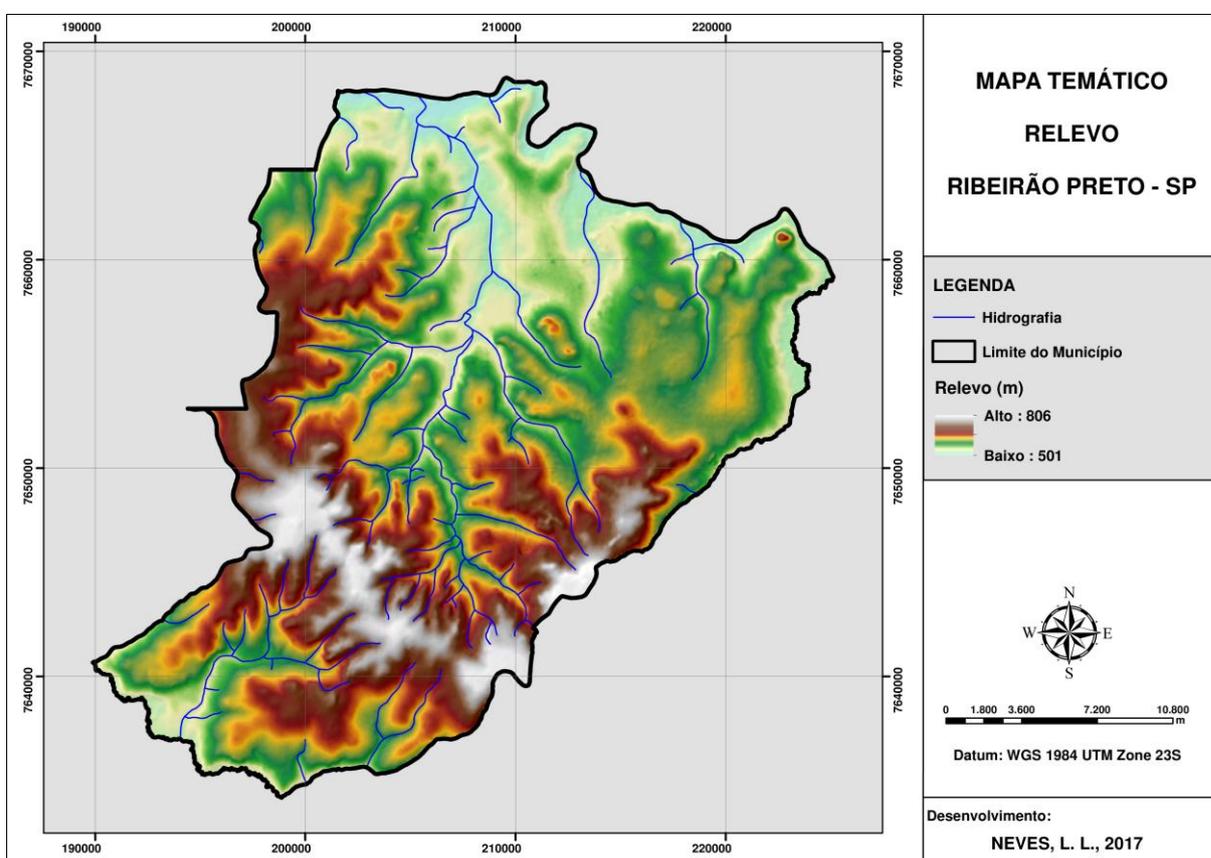


Figura 16. Mapa temático de relevo do município de Ribeirão Preto – SP.

3.2 Materiais e métodos

A pesquisa foi desenvolvida e organizada em cinco etapas. A primeira delas, de inventário, consistiu na reunião de informações em uma base de dados no âmbito da área de estudo, contemplando fatores como informações topográficas, histórico de incêndios, banco de dados cartográficos, definições conceituais, entre outros. A segunda etapa referiu-se ao mapeamento em ambiente SIG dos índices de perigo, analisando os componentes elencados no inventário de forma a criar associações de causa e efeito destes indicadores em relação aos incêndios e embasar a elaboração dos modelos finais de suscetibilidade. A terceira etapa baseou-se na aplicação da ponderação formulada para os indicadores de ignição e propagação do fogo, retornando seus respectivos mapas. A quarta etapa consistiu na inserção dos pesos para cada mapa (ignição e propagação) para a formulação do mapa final de suscetibilidade. E por fim, a última etapa englobou a avaliação dos resultados encontrados, analisando as interpelações entre os indicadores e a análise temporal.

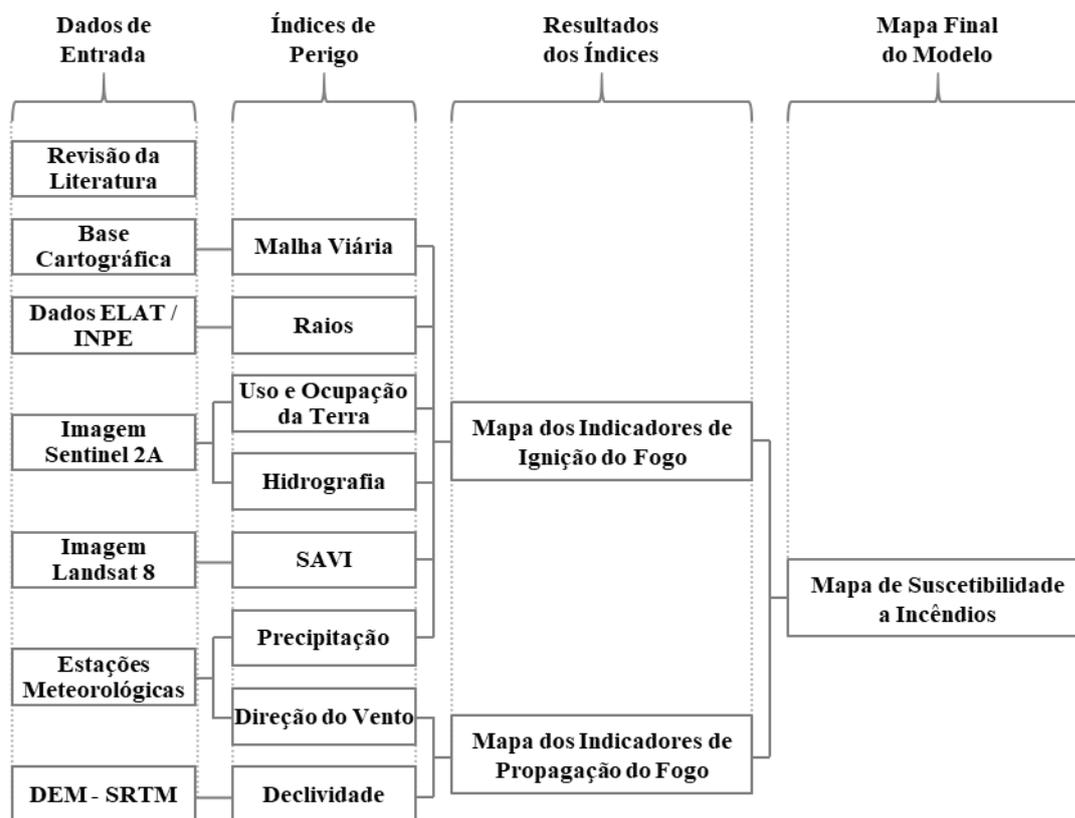


Figura 17. Fluxograma da metodologia adotada.

Para este estudo, os fatores considerados necessários para se avaliar a suscetibilidade a incêndios, assim como exposto no Item 2.3, foram divididos em dois grupos: indicadores de ignição e indicadores de propagação. Os indicadores de ignição são aqueles capazes de influenciar na origem do foco em si, devido à uma ação antrópica ou natural. Foram elencados

como indicadores de ignição: a (1) precipitação; o (2) SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo); o (3) uso e ocupação da terra; a (4) distância da malha viária; a (5) distância de corpos d'água; e a (6) incidência de raios. Já os indicadores de propagação são aqueles que favorecem o alastramento da chama devido às suas forças de convecção e irradiação. É o caso da (7) declividade e da (8) orientação das vertentes do relevo atrelada à direção do vento.

Os indicadores (com exceção dos dados de raios) foram levantados e/ou mapeados seguindo dados referentes ao período de março de 2015 a fevereiro de 2016. Alguns destes planos de informação são considerados temporalmente estáticos, ou possuem variação desprezível quando considerado o período de um ano do estudo. É o caso da declividade, do uso e ocupação da terra (com exceção da classe de áreas úmidas devido às dinâmicas de cheia e estiagem), da distância da malha viária e corpos d'água e da direção do vento (apesar da direção do vento possuir evidente alteração temporal, neste estudo fez-se uso de sua média histórica para o município). Entretanto, outros indicadores possuem variação temporal, como é o caso da precipitação, da incidência de raios e do SAVI. Sabendo disso, optou-se por analisar o modelo final de suscetibilidade mensalmente, de forma inclusive a avaliar a influência da escala temporal no trabalho. Além da bibliografia disponível, também se fez uso do software ArcMap (v. 10.3) na interface do SIG para se alcançar os objetivos propostos. Os pixels das imagens resultantes de todos os indicadores foram normalizados em uma escala de 0 a 1 por meio dos valores máximo e mínimo encontrados dentro de cada classe e reamostrados para 30m para que pudessem ser interpretados da mesma forma.

3.2.1 Precipitação

Os índices de precipitação relacionados ao período citado foram levantados a partir de 9 estações meteorológicas (Tabela 11) inseridas em um raio de 100 km do município (Figura 18).

A precipitação mensal de cada uma delas, associada à normal climatológica anual das mesmas, nos permitiu calcular seu respectivo déficit hídrico mensal de forma recursiva (dependente do déficit acumulado ao longo de 3 meses).

$$P_{D(i)} = P_N - P_i, \text{ e recursivamente: } \begin{cases} D_{A(i)} = P_{D(i)} \\ D_{A(i+1)} = D_{A(i)} + P_{D(i+1)} \\ D_{A(i+2)} = D_{A(i+1)} + P_{D(i+2)} \end{cases} \quad (6)$$

Onde:

$D_{A(i)}$: Déficit de precipitação acumulado para o mês i

$P_{D(i)}$: Déficit de precipitação para o mês i

P_N : Precipitação média anual (normal climatológica)

P_i : Precipitação total no mês i

Tabela 11. Identificação das estações meteorológicas presentes em um raio de 100 km de Ribeirão Preto e suas respectivas fontes de informação.

Ponto	Localização	Fonte dos dados
1	Franca, SP	INMET
2	São Simão, SP	INMET
3	São Carlos, SP	INMET
4	Rib. Preto, SP - Jd. São José	CEMADEN
5	Rib. Preto, SP - Jd. Professor Antonio Palocci	CEMADEN
6	Rib. Preto, SP - Centro	CEMADEN
7	Rib. Preto, SP - Vila Mariana	CEMADEN
8	Rib. Preto, SP - Jardim Progresso	CEMADEN
9	Rib. Preto, SP - Subsetor Oeste	CEMADEN

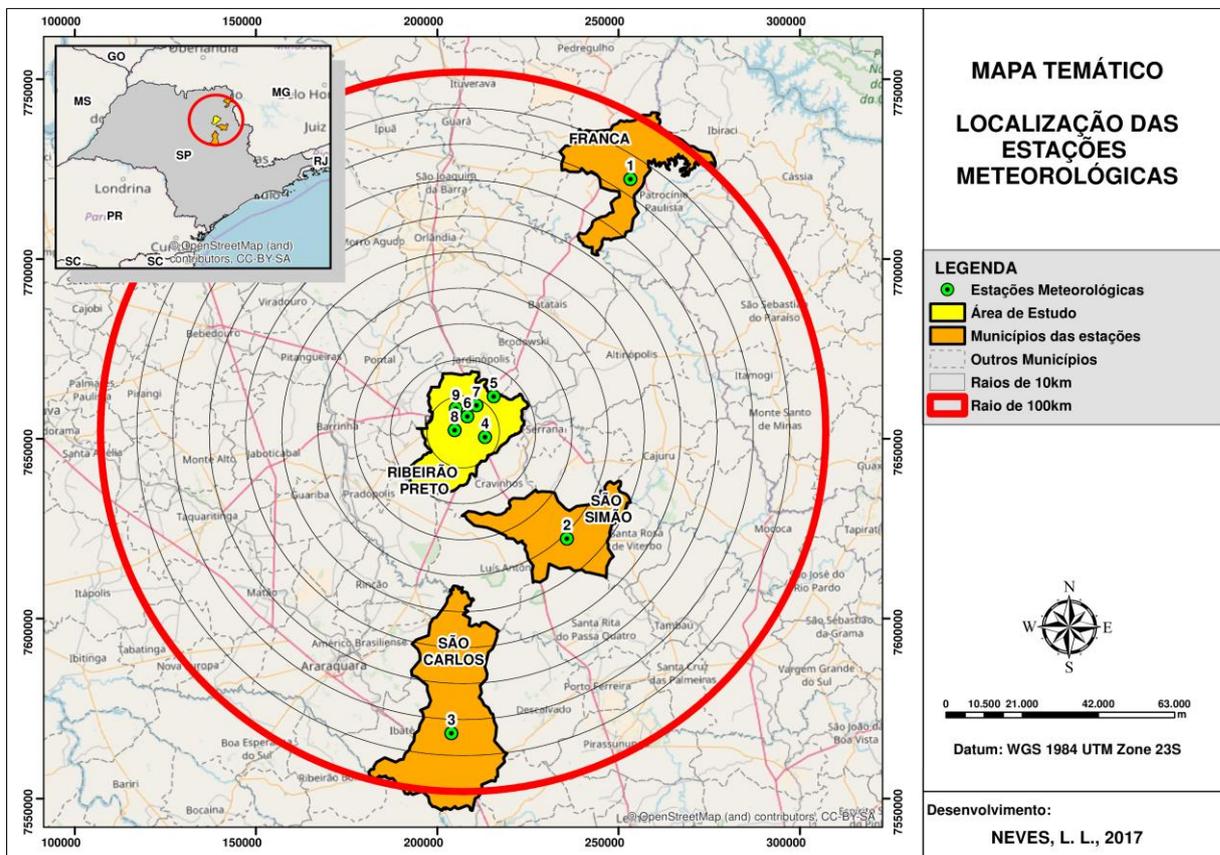


Figura 18. Mapa de localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo (100 km de Ribeirão Preto).

Desta forma, entende-se esse déficit como cumulativo – ou seja, se não choveu o esperado no mês 1 e no mês 2, entende-se que a probabilidade de ocorrência de um foco de incêndio no mês 2 é maior que no mês 1. Neste estudo, conforme mostra a Equação 6, foi calculado o déficit hídrico acumulado referente aos últimos 3 meses. Este banco de dados foi inserido em um ambiente SIG e associado aos pontos de localização das coordenadas das respectivas estações

meteorológicas. Estes pontos foram interpolados utilizando a técnica IDW², gerando 12 arquivos de imagem (*raster*). Os resultados mensais foram normalizados em uma escala de 0 a 1, que são, respectivamente, os menores e os maiores valores encontrados dentre os 12 meses estudados.

3.2.2 Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI)

Em um primeiro momento, optou-se pela utilização do NDVI para a análise da vegetação. Entretanto, resultados preliminares mostraram certa dificuldade em encontrar um valor limiar que fosse capaz de diferenciar áreas de solo exposto e urbanização com áreas de cana colhida (palhada). Devido à importância desta diferenciação, entendendo que a palha da cana é considerada altamente suscetível ao fogo, contrário do que ocorre às áreas de solo exposto e urbanização (ver Item 2.2), optou-se por fazer uso do SAVI, exatamente pela sua capacidade em diferenciar diferentes formas de exposição do solo.

Este índice foi calculado por meio de imagens do satélite *Landsat 8* porque não haviam imagens do satélite *Sentinel 2* disponíveis no período citado, visto que esta missão teve início somente em junho de 2015. No período do estudo, foram encontradas somente imagens referentes aos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e outubro, outras imagens disponíveis foram desconsideradas pela presença excessiva de nuvens que influenciariam nos resultados. Entretanto, devido à baixa variação temporal deste indicador, assumiu-se que a quantidade de imagens disponíveis atenderia aos objetivos do trabalho. Este indicador foi calculado em SIG a partir das bandas do infravermelho (B5) e do vermelho (B4) do citado satélite, através da equação abaixo.

$$SAVI = \frac{(1 + Ls) * (B5 - B4)}{(B5 + B4 + Ls)} \quad (7)$$

Onde Ls é uma constante denominada fator de ajuste do índice SAVI, podendo assumir valores de 0,25 a 1 dependendo da cobertura do solo. Conforme Huete (1988 apud BORATTO; GOMIDE, 2013) um valor para Ls de 0,25 é indicado para vegetação densa, de 0,5 para vegetação com densidade intermediária e de 1 para vegetação com baixa densidade. Para o presente trabalho, foi adotado o valor de Ls = 0,5.

O resultado retorna imagens com valores de pixel que variam de -1 a 1, onde valores mais próximos de 1 indicam áreas com menor estresse hídrico (ou maiores níveis de biomassa)

² IDW (*Inverse Distance Weighting* ou Ponderação do Inverso da Distância) é uma técnica de interpolação de dados que pressupõe que a variável que está sendo mapeada diminui de acordo com a distância da localização da amostra (ESRI, 2016).

e, portanto, menor risco de incêndio (ver Item 2.3.2.2). Estas imagens foram normalizadas em uma escala de 0 a 1, através do menor e maior valor encontrado dentre todos os meses levantados. Isto permitiu a equiparação das informações tanto entre os meses explorados quanto em relação aos outros indicadores trabalhados.

Entretanto, entende-se que áreas de urbanização e solo exposto, que, por não terem muito vigor e biomassa, englobam classes próximas de 0, mas não obedecem a proporcionalidade do SAVI no que diz respeito aos incêndios, pois assume-se que a suscetibilidade de ocorrência de um foco nestas áreas é praticamente nula. Para tanto, um limiar de valor 0,14 (obtido através da análise dos produtos SAVI em relação as imagens do visível) foi adotado para diferenciar estas classes de uso daquelas que realmente são mais suscetíveis aos incêndios, como áreas de cana palhada. Portanto, valores abaixo deste limiar foram convertidas em valor máximo (1) para que adotassem o menor valor de risco de incêndio.

Dada a escala final do trabalho, em que 0 corresponde a áreas com menor risco de incêndio e 1 áreas com maior risco, os arquivos de imagem de saída deste indicador (SAVI) tiveram de ser invertidos para que valores com menos biomassa ou maior estresse hídrico (a princípio mais próximos de 0) recebessem valores mais próximos de 1, ou seja, maior risco de incêndio.

3.2.3 Uso e ocupação da terra

O uso e ocupação da terra do município de Ribeirão Preto foi digitalizado utilizando-se imagens do satélite *Sentinel 2A*, datadas do mês de agosto de 2016. As classes de uso presentes no município foram classificadas seguindo em parte a metodologia proposta por Ferraz e Vettorazzi (1998), onde a combustibilidade e o movimento de pessoas naquele tipo vegetacional é categórica. Assim, as seguintes classes de uso foram adotadas: Áreas Úmidas; Benfeitorias; Cana-de-Açúcar; Corpos d'água; Eucalipto; Outras Culturas; Pastagens; Urbanização; Vegetação Nativa e; Outros. Aqui, entende-se por outras culturas qualquer outro cultivo ademais à cana de açúcar ou ao eucalipto, como plantações de seringueiras ou citricultura. Benfeitorias são pequenas construções presentes na zona rural do município, podendo ser algum conjunto de chácaras, sedes de propriedades rurais ou ainda algum tipo de indústria mais afastada do perímetro urbano. Áreas úmidas são regiões que esporadicamente se alagam devido à proximidade com corpos d'água, mas que, por não possuírem arborização densa, não merecem atribuição à classe de vegetação. E por fim, a classe 'outros' se refere principalmente à estradas, rodovias e carregadores que não necessitam categorização.

A ponderação do uso e ocupação da terra foi feita com base na proposta de Ferraz e Vettorazzi (1998), onde a combustibilidade de um determinado uso tem papel fundamental, atrelando a mesma à análise temporal e espacial dos focos de calor registrados no município.

Reconhecendo a baixa variabilidade temporal da dinâmica de uso e ocupação da terra, os focos de incêndio ocorridos no município entre 1998 e 2016 (INPE) foram interseccionados com este indicador através do ArcMap. Isto permitiu a análise da densidade de focos por classe de uso, de forma a inferir a relevância de cada um para o presente estudo. Assim, foram atribuídos diferentes pesos que variam de 0 a 10, tanto para o fator combustibilidade quanto pelo fator ocorrência de focos. A ponderação final de cada classe de uso foi calculada seguindo a fórmula a seguir:

$$P(u) = P(c) * P(o) \quad (8)$$

Onde:

$P(u)$: Ponderação de cada classe de uso e ocupação da terra;

$P(c)$: Peso atribuído pelo fator combustibilidade;

$P(o)$: Peso atribuído pelo fator ocorrência de focos.

Ferraz e Vettorazzi (1998) classificaram áreas de pastagem e de cana-de-açúcar como aquelas com alta combustibilidade, enquanto áreas de mata possuem baixa combustibilidade. O mesmo raciocínio é trazido por Ribeiro, Soares e Beppler (2012), que ponderaram classes de água e afloramentos com valor nulo e classes de agricultura com risco alto, sucedido por pastagem, com risco extremo. A alta combustibilidade da cana é reforçada ao considerar índices de vegetação, conforme exposto no item 3.2.2, que indicam um aumento do vigor e biomassa ao longo do ciclo fenológico, o que diminui significativamente durante o período de maturação (RAMME et al., 2010), momento no qual a susceptibilidade a incêndios também passa a ser maior. A associação da densidade de focos em cada uso com seu respectivo grau de combustibilidade retornou os pesos utilizados na classificação.

No caso da classe de áreas úmidas em particular, assumindo as variações sazonais de cheia e estiagem e sua influência na ocorrência de um foco de incêndio, adotou-se uma classificação temporal, onde os meses foram ponderados proporcionalmente de acordo com a amostra histórica (1998 – 2016) de incidência de focos nesta classe de uso. O gráfico da Figura 19 ilustra esta proporcionalidade; observamos que os meses de dezembro a abril (chuvosos) obtiveram peso '0' na análise pois não foram registrados focos de incêndios nesta classe de uso no período citado, enquanto o mês de setembro, por exemplo, que é o mais seco e que, portanto,

registrou mais ocorrências de focos (11 no período), obteve peso máximo, ‘8’, proveniente da ponderação da classe ($P_c * P_o$) feita a seguir (Tabela 12).

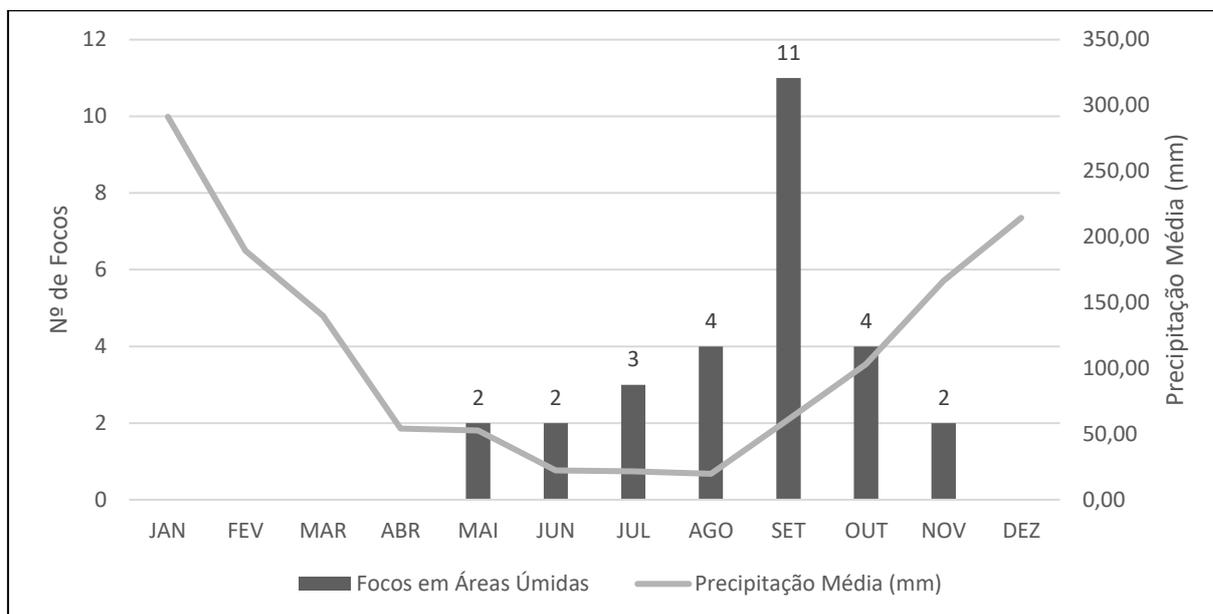


Figura 19. Gráfico da relação mensal entre áreas úmidas e precipitação média (mm).

Tabela 12. Ponderação das classes de uso e ocupação da terra.

Classe de uso e ocupação	Combustibilidade P(C)	Ocorrência de Focos P(O)	Ponderação da classe $P(C) * P(O)$
Outras Culturas	Média - 5	3	15
Eucalipto	Alta - 10	7	70
Corpos d'água	Nula - 0	1	0
Área Úmida	Muito Baixa - 1	8	8
Outros	Muito Baixa - 1	10	10
Benfeitorias	Baixa - 2	5	10
Pastagem	Alta - 8	4	32
Urbanização	Muito Baixa - 1	2	2
Vegetação Nativa	Baixa - 3	6	18
Cana de Açúcar	Alta - 9	9	81

3.2.4 Distância da malha viária e corpos d'água

Os indicadores de distância da malha viária e distância de corpos d'água seguiram metodologia similar. Após o levantamento das estradas e rodovias do município – disponíveis no portal da prefeitura – e vetorização da hidrografia (com base em imagens orbitais *Sentinel 2A*), ambas as feições foram submetidas ao cálculo de suas distâncias euclidianas. Ao contrário do que muitos autores propõem ao inferir barreiras nesta análise, tomando distâncias de forma

booleana ou binária³ entre 50m e 100m de influência das feições, neste trabalho optou-se por considerar que, à medida que se distancia da feição, seja da malha viária ou da hidrografia, a suscetibilidade a um foco aumenta ou diminui de acordo com a função de Gauss, onde sua distribuição decai (ou cresce, no caso de corpos d'água) rapidamente até valores próximos de 0 (ou 1, no caso de corpos d'água) para distância da ordem de 100m, de acordo com a Figura 20 e Equações 9 e 10 abaixo.

$$P_{mv} = \exp\left(-\frac{D_{mv}^2}{2} * (0,03^2)\right) \quad (9)$$

$$P_{ca} = 1 - \exp\left(-\frac{D_{ca}^2}{2} * (0,03^2)\right) \quad (10)$$

Onde:

P_{mv} : Peso em função da Distância da Malha Viária (D_{mv})

P_{ca} : Peso em função da Distância de Corpos D'Água (D_{ca})

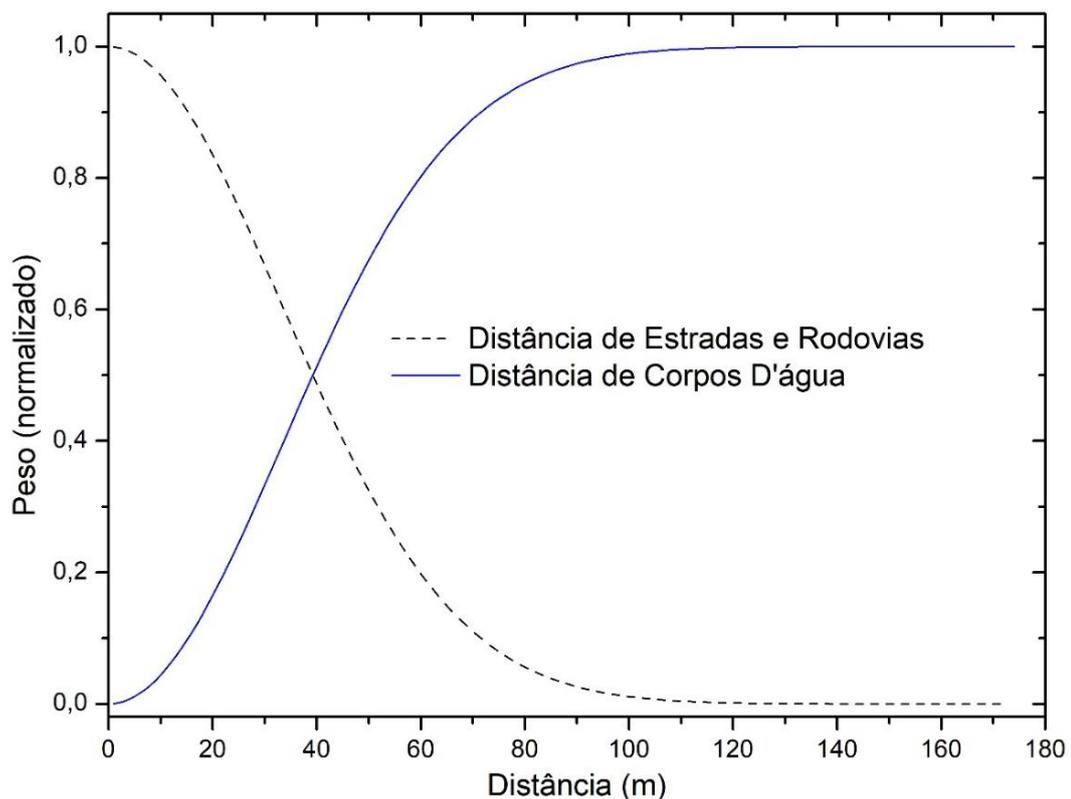


Figura 20. Gráfico da relação entre a distância de malha viária/corpos d'água e o grau de risco de um foco de calor.

³ Adotar uma interpretação na forma booleana ou binária significa dizer que este valor é *verdadeiro* ou *falso*; ou seja, no exemplo dado, distâncias entre 0 e 50m ou 0 e 100m são consideradas áreas sob influência, enquanto distâncias maiores que isto (>50m ou >100m) são consideradas áreas sem influência.

Ambos os resultados foram normalizados em uma escala de 0 a 1. Pelo fato do indicador de distância da malha viária ter efeito contrário ao do indicador de distância de corpos d'água, ou seja, quanto mais distante das estradas menor o risco de incêndio, enquanto quanto mais distante dos corpos d'água maior o risco de um foco, o arquivo de imagem de saída deste último indicador sofreu inversão.

3.2.5 Incidência de raios

Os dados de incidência de Raios no município de Ribeirão Preto foram obtidos junto ao ELAT. As informações são oriundas da Rede Nacional Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) e fornecem a localização e horário de ocorrência das descargas que envolvem o solo (relâmpagos nuvem-solo), além de parâmetros como pico de corrente e outras informações do próprio sistema. Maiores detalhes sobre a rede e sobre o próprio sistema podem ser obtidos nos trabalhos de Naccarato (2006) e Cummins (2009). Para este estudo, foram utilizadas apenas a localização e o instante de ocorrência. Os dados pontuais no período de 1999 a 2009 foram inseridos no ambiente SIG, separados por meses e submetidos ao cálculo de suas respectivas densidades mensais através da ferramenta *Kernel Density*. Portanto, estes dados não integram o período de um ano utilizado no estudo (2015/16), mas fornecem uma climatologia de uma década, que foi considerada representativa da distribuição mensal dos relâmpagos sobre o município. Os resultados mensais foram normalizados em uma escala de 0 a 1, a partir do valor mínimo e máximo dentre todos os meses estudados.

3.2.6 Declividade

A declividade da área de estudo foi obtida através do modelo digital de elevação – MDE (SRTM) disponibilizado pela TOPODATA. Preferiu-se esse dado ao disponibilizado pela USGS devido a maior homogeneidade e ausência de ruídos sobre a região de estudo. Este produto, com resolução espacial de 30m, foi submetido à ferramenta *SLOPE* presente no SIG, obtendo uma imagem com classes de declive em graus. Para cada célula, esta ferramenta calcula a taxa máxima de mudança de valor desse pixel para seus vizinhos. Basicamente, a mudança máxima de elevação sobre a distância entre a célula e seus oito vizinhos (pixels vizinhos) identifica a descida descendente mais íngreme da célula. O resultado foi normalizado em uma escala de 0 a 1.

3.2.7 Orientação das vertentes atrelada à direção do vento

Por fim, a exposição atrelada à direção do vento é um indicador que procura representar a influência do vento para o presente estudo e ainda associá-lo às diferentes direções de exposição das vertentes de um relevo. A análise histórica (1961 – 1990) dos dados de estações do INMET adjacentes à Ribeirão Preto mostra que a direção (ponto de origem) do vento predominante (normal climatológica) no município é nordeste (INMET, 1992), isto significa que vertentes voltadas à esta direção terão peso máximo devido à soma de forças que moveriam a chama na direção do aclave.

A associação de tal ocorrência às vertentes voltadas para a mesma direção do vento dá ainda mais poder de radiação e convecção para a chama exatamente por diminuir ainda mais sua distância da superfície. O cálculo desta junção de fatores foi feito utilizando a Tabela 13 a seguir.

Tabela 13. Ponderação do indicador de direção do vento atrelado à orientação da vertente.

		ORIENTAÇÃO DAS VERTENTES							
		N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
DIREÇÃO DO VENTO	N	1	0,75	0,5	0,25	0	0,25	0,5	0,75
	NE	0,75	1	0,75	0,5	0,25	0	0,25	0,5
	E	0,5	0,75	1	0,75	0,5	0,25	0	0,25
	SE	0,25	0,5	0,75	1	0,75	0,5	0,25	0
	S	0	0,25	0,5	0,75	1	0,75	0,5	0,25
	SO	0,25	0	0,25	0,5	0,75	1	0,75	0,5
	O	0,5	0,25	0	0,25	0,5	0,75	1	0,75
	NO	0,75	0,5	0,25	0	0,25	0,5	0,75	1

Após o levantamento das informações de orientação das vertentes no ArcMap através da ferramenta *Aspect*, procedeu-se a classificação (ou ponderação) das direções resultantes. Tomando NE como direção do vento predominante para o município, adotou-se os seguintes valores de classificação para cada uma das direções de orientação das vertentes (Figura 21): N – 0,75; NE – 1; E – 0,75; SE – 0,5; S – 0,25; SO – 0; O – 0,25 e; NO – 0,5. Vale ressaltar que a direção do vento varia significativamente em diferentes escalas temporais, mas a análise buscou verificar seu comportamento médio na área de estudo. O resultado desta análise foi normalizado em uma escala de 0 a 1.

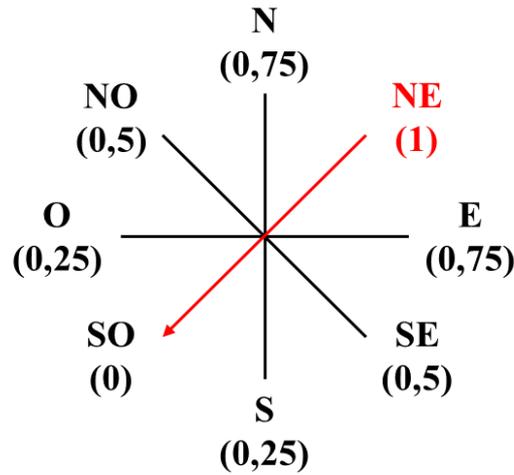


Figura 21. Representação das direções de exposição das vertentes e suas respectivas atribuições de peso de acordo a direção do vento predominante (NE), destacada em vermelho.

3.2.8 Modelos de ignição e propagação do fogo

Como já mencionado, os arquivos resultantes de todos os indicadores supracitados foram normalizados em uma escala de 0 a 1 e reamostrados para 30m para que estes pudessem ser interpretados de forma equitativa. As Equações 11, 12 e 13 resumem a ponderação adotada integrando o resultado em termos de ignição e propagação, para fornecer o mapa final de suscetibilidade.

$$R_{Ign} = ((S_i \times U_i) \times 10) + (Mv \times 2) + (H \times 1) + (P_i \times 8) + (R_i \times 1) \quad (11)$$

$$R_{Prop} = (Ev * D) + 0,1 \quad (12)$$

$$Sm_i = (R_{Ign} * 0,9) + (R_{Prop} * 0,1) \quad (13)$$

Onde:

Sm_i : Suscetibilidade a incêndio no mês i

R_{ign} : Risco de incêndio referente aos indicadores de ignição no mês i

R_{prop} : Risco de incêndio referente aos indicadores de propagação no mês i

S_i : SAVI referente ao mês i (quando houver)

U_i : Uso e ocupação da terra referente ao mês i

Mv : Distância da malha viária

H : Distância de corpos d'água

P_i : Precipitação referente ao mês i

R_i : Incidência de Raios referente ao mês i

Ev : Exposição da vertente atrelada à direção do vento

D : Declividade

Os riscos de incêndio referentes aos indicadores de ignição foram ponderados por meio do referencial teórico disponível correspondente a cada indicador, além de testes conduzidos a fim de compatibilizar o modelo com a realidade do município. Os riscos pertinentes aos indicadores de propagação não foram ponderados pois entende-se que suas influências no modelo são proporcionais. A adição de 0,1 em sua Equação (12) está relacionada à necessidade da não obtenção de valores zerados como resultado, pois isto anularia o fator propagação da análise.

A suscetibilidade final calculada através da Equação 13 concede aos indicadores de ignição 90% de significância frente ao modelo, enquanto os outros 10% ficam a cargo dos indicadores de propagação. Esta proporção se dá pelo fato de que não existe propagação sem primeiramente haver ignição. Portanto, atribuir pesos similares para indicadores de propagação e ignição resultaria em um entendimento errôneo sobre as condições necessárias para a ocorrência de um incêndio. Além disso, Ribeirão Preto não é considerado um município com declividade acentuada, ou com grande intensidade de vento, o que atenua o peso dos indicadores de propagação.

Destaca-se que a aplicação do modelo resulta em mapas mensais de suscetibilidade. Em função da ausência de imagens para a composição do índice SAVI em alguns meses, os mapas de suscetibilidade foram divididos em dois cenários mensais: um considerando os meses com o SAVI disponível e outro desconsiderando o SAVI. O fluxograma a seguir (Figura 22) representa o modelo adotado com a inserção do SAVI.

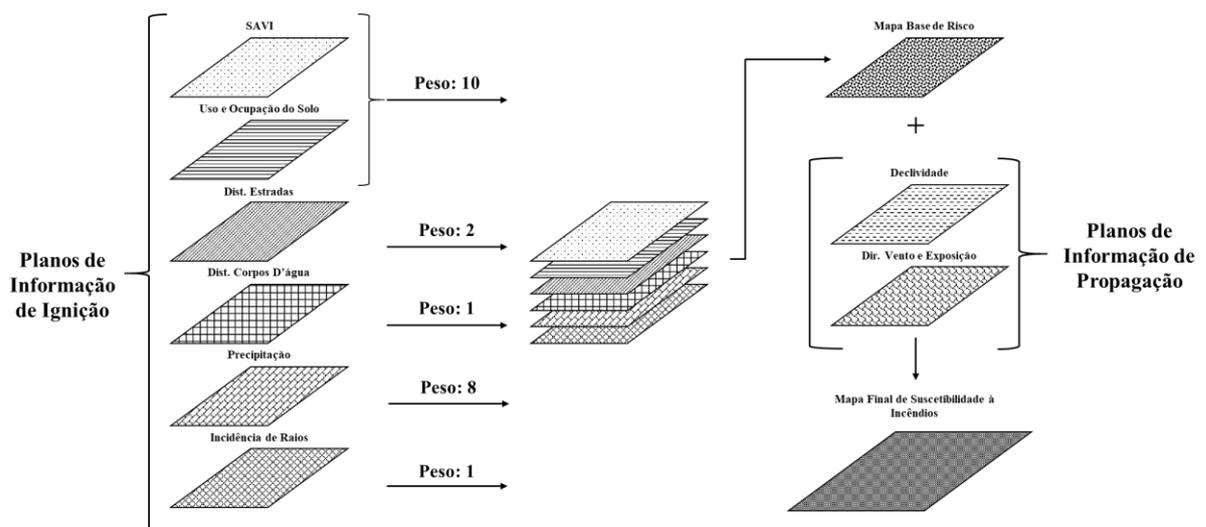


Figura 22. Fluxograma representando o modelo de interpretação dos planos de informação com a inserção do SAVI.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Indicadores de ignição

A análise do SAVI nos permitiu verificar claramente a importância da variação temporal para o presente estudo. Um comparativo da classificação do SAVI em abril e agosto de 2015 é apresentado na Figura 23.

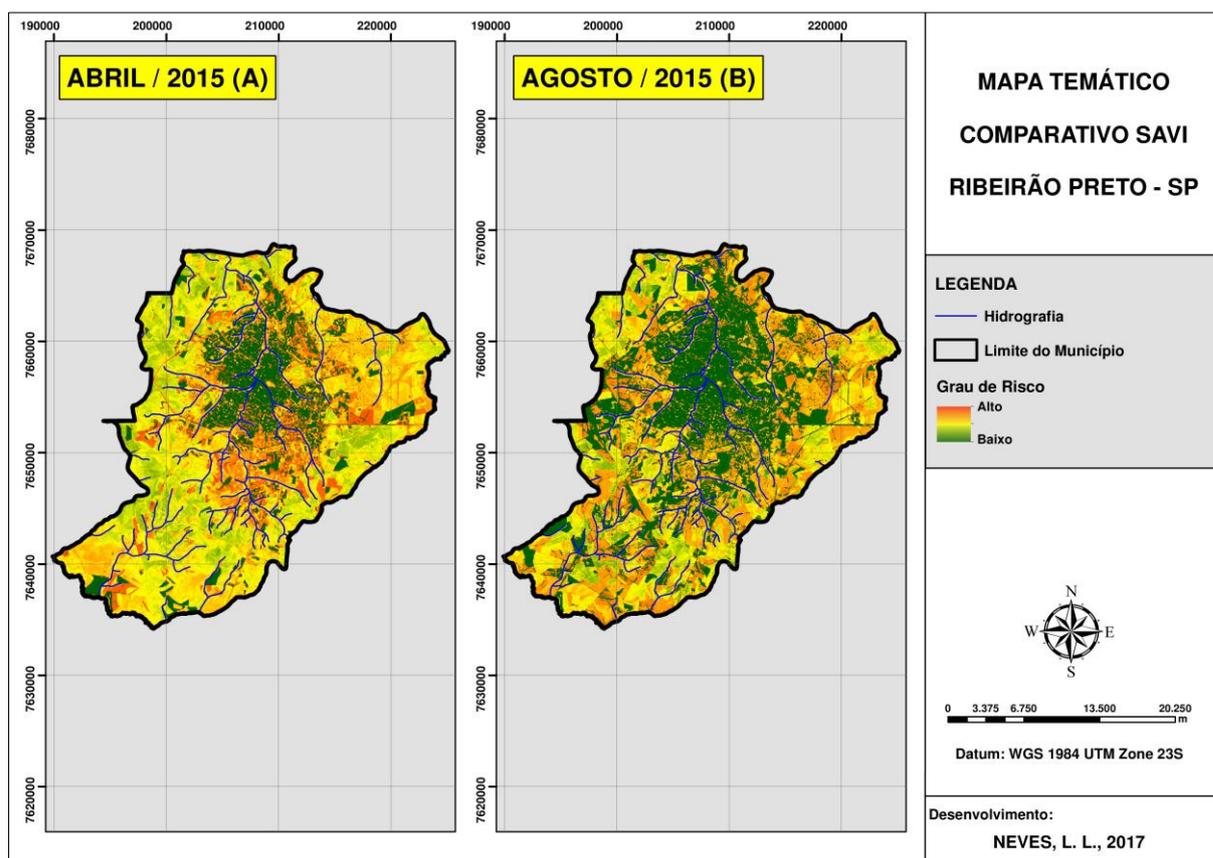


Figura 23. Mapa das imagens do índice SAVI referentes aos meses de abril/2015 (A) e agosto/2015 (B).

Ao observarmos as áreas de culturas agrícolas, especificamente, é possível avaliar que no mês de abril o estresse hídrico é consideravelmente menor se comparado ao mês de agosto. Isso se deve principalmente à associação de dois fatores: à dinâmica temporal de chuvas (Figura 24) e ao estágio de cana-de-açúcar naquele momento. No mês de abril a safra de cana-de-açúcar muitas vezes ainda não teve início, isto significa que ela ainda não foi colhida e seu vigor (e/ou sua biomassa) está significativamente maior, principalmente pelos maiores níveis de precipitação dos meses que a antecederam. Isto acarreta em menores taxas de suscetibilidade a incêndio. Efeito contrário ao que ocorre em agosto, quando a safra da cana já é corrente e períodos de estiagem já se sucederam. Isto diminui significativamente a biomassa verde da cana e acarreta no surgimento de sua palha. Esta palha é altamente suscetível ao fogo (alta combustibilidade), fator que é intensificado pela (ainda recorrente) prática de queima da

mesma. Isto tudo faz com que em períodos mais secos, que compreendem os meses de agosto a outubro, a suscetibilidade a incêndios seja consideravelmente maior.

Já a maior quantidade de áreas verdes encontradas na imagem de agosto é explicada pela inversão do fator de solo exposto explanado no item 3.2.2. Em agosto, há uma quantidade maior de áreas que já foram colhidas e estão sendo preparadas para um novo plantio. Estas classes estão enquadradas como solo exposto, e, portanto, abaixo do limiar de 0,14 delimitado. Dessa forma, fazendo jus à metodologia proposta, estas áreas não são consideradas suscetíveis à ocorrência de incêndios.

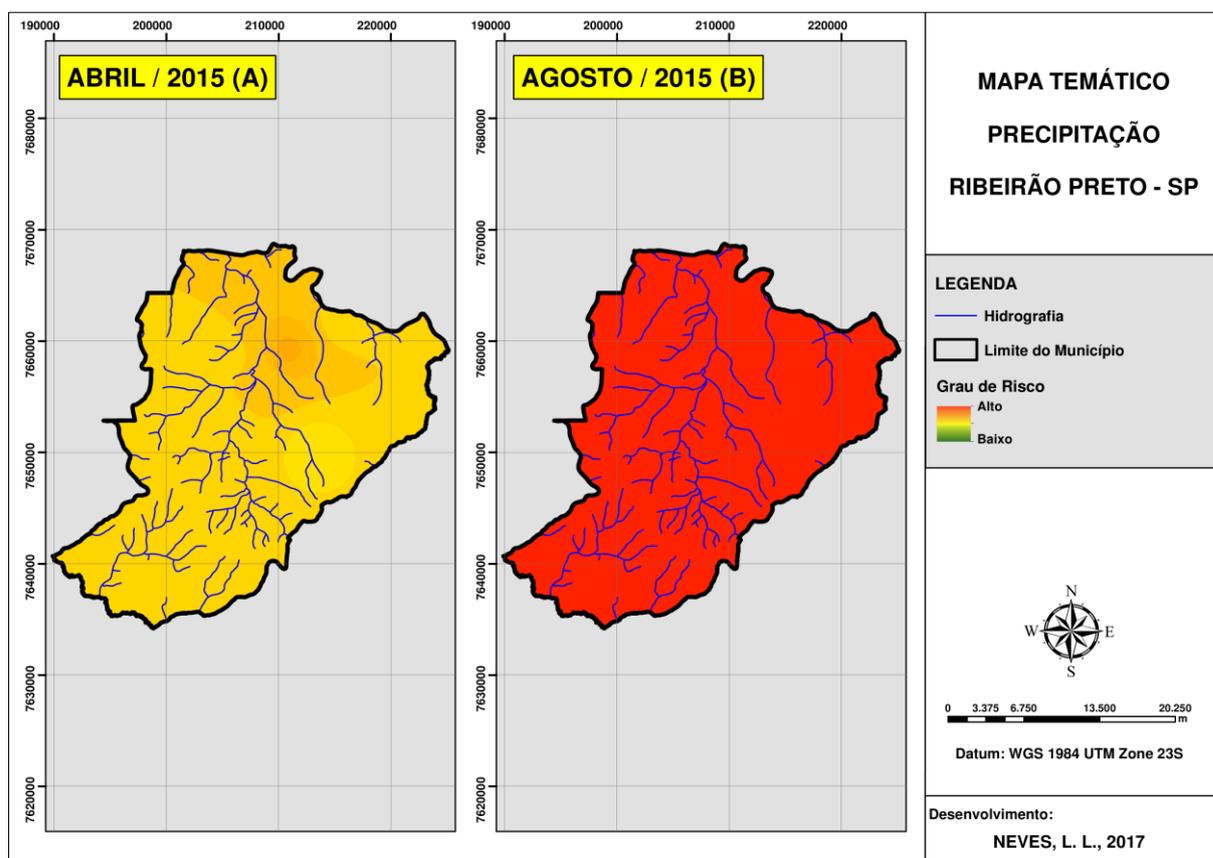


Figura 24. Mapa das imagens do índice de precipitação referentes aos meses de abril/2015 (A) e agosto/2015 (B).

O mapa de uso e ocupação da terra (Figura 25) evidencia a preponderância da cana-de-açúcar no município (52% - Tabela 14). O fato desta classe de uso dominar boa parte da área de estudo atrelada à ainda recorrente prática de queima da palha de cana explica o alto grau dado a este indicador na ponderação e, conseqüentemente, para esta classe de uso na análise. Além disso, observa-se que, após a classe de cana-de-açúcar, a urbanização e vegetação nativa são aquelas com maior evidência na área de estudo, o que atenua a suscetibilidade a incêndios nestas regiões.

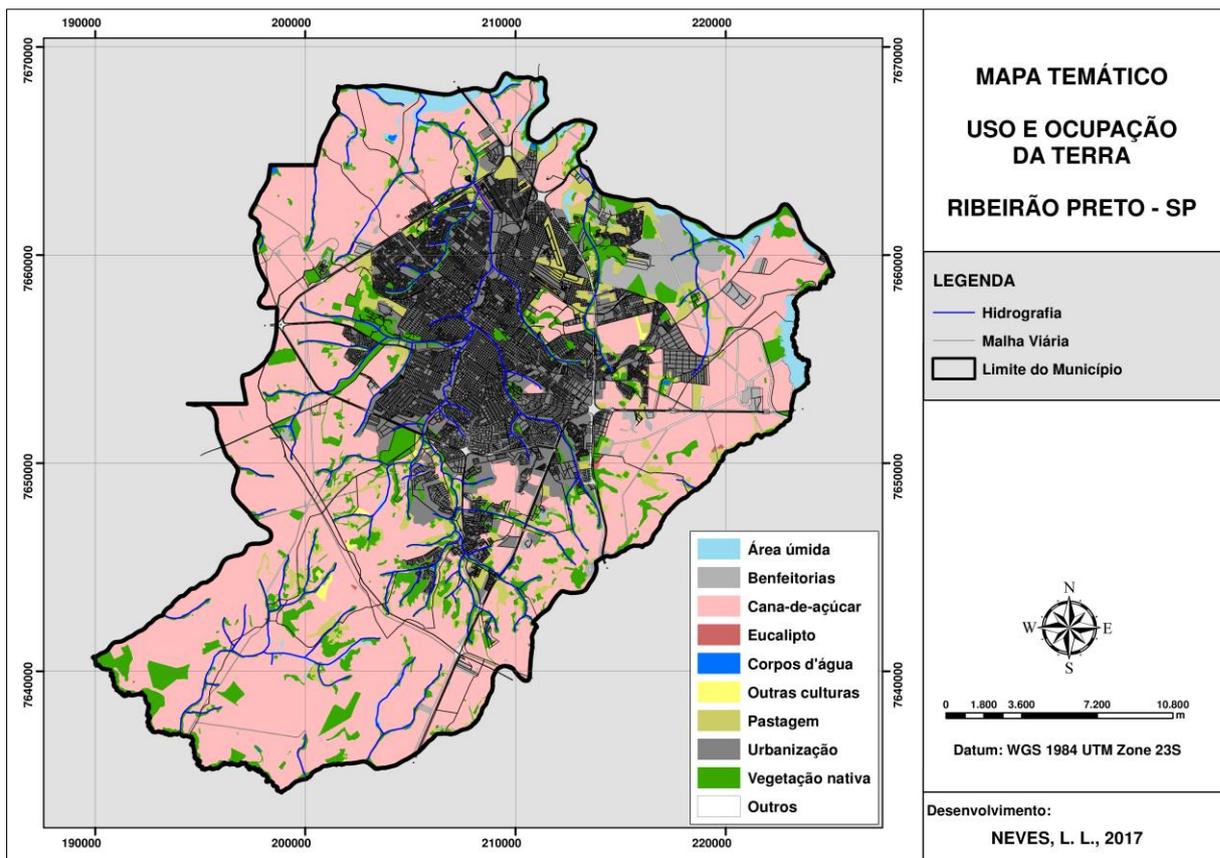


Figura 25. Mapa de uso e ocupação da terra do município de Ribeirão Preto – SP.

Tabela 14. Resumo das áreas pertinentes à cada classe de uso.

Classificação	Área (km²)	%
Área úmida	13,67	2,10%
Benfeitorias	20,54	3,15%
Cana-de-açúcar	339,23	52,04%
Corpos d'água	2,53	0,39%
Eucalipto	0,98	0,15%
Outras culturas	1,06	0,16%
Pastagem	36,08	5,54%
Urbanização	141,17	21,66%
Vegetação Nativa	81,66	12,53%
Outros	14,92	2,29%
Total	651,84	100,00%

No que diz respeito aos corpos d'água, evidencia-se uma considerável contribuição na contenção do risco a incêndios em seu entorno. Efeito contrário ao da malha viária, que eleva o grau de risco nesta região. Os resultados destas análises são apresentados nas Figuras 26 e 27.

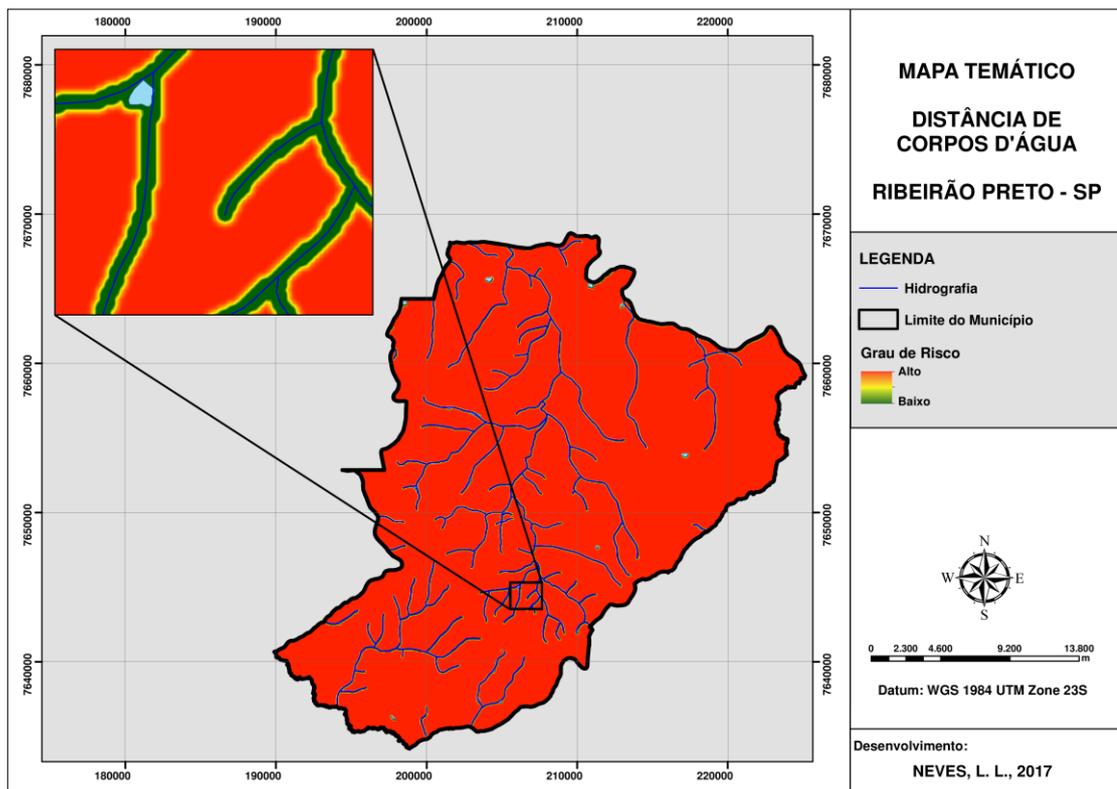


Figura 26. Mapa da relação do grau de risco de incêndios em função da distância de corpos d'água.

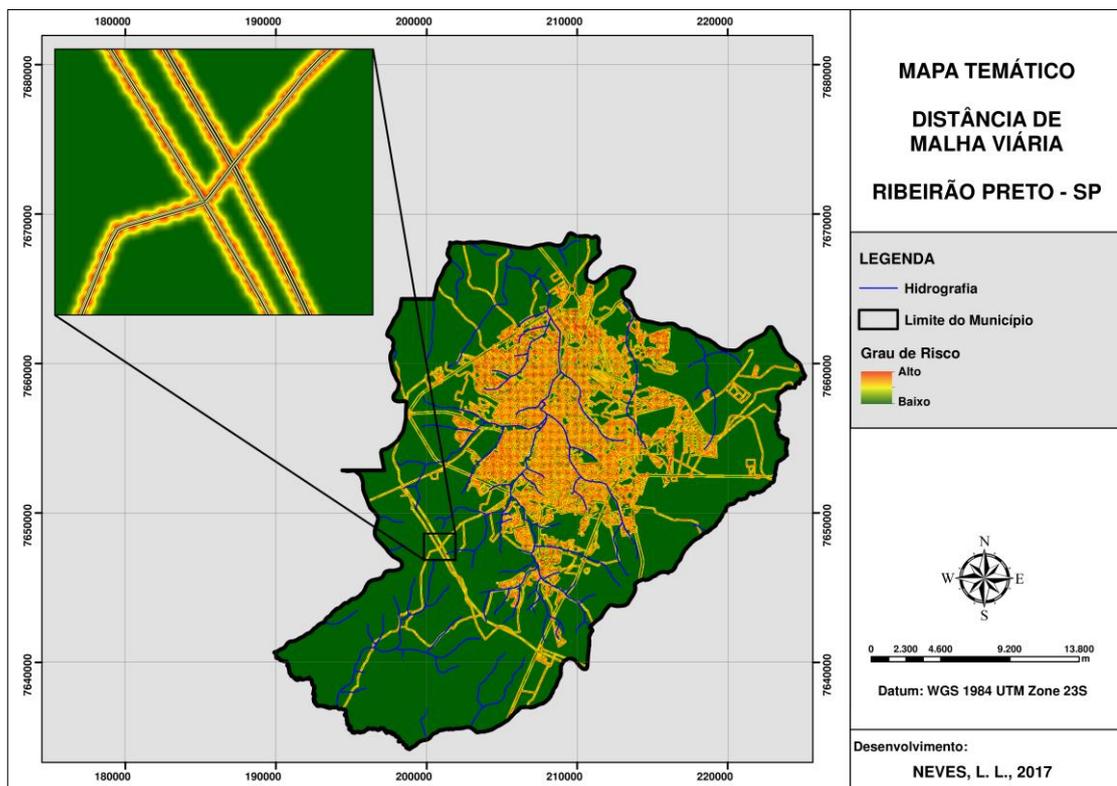


Figura 27. Mapa da relação do grau de risco de incêndios em função da distância da malha viária.

Os mapas mensais de incidência de raios (contagem de eventos nos limites da área de estudo) e precipitação são os que possuem distribuição mais homogênea na região de estudo

visto que são mapas de densidade. Entretanto ainda pode ser observada grande variação de seus valores ao longo dos meses como apresentado na Figura 28.

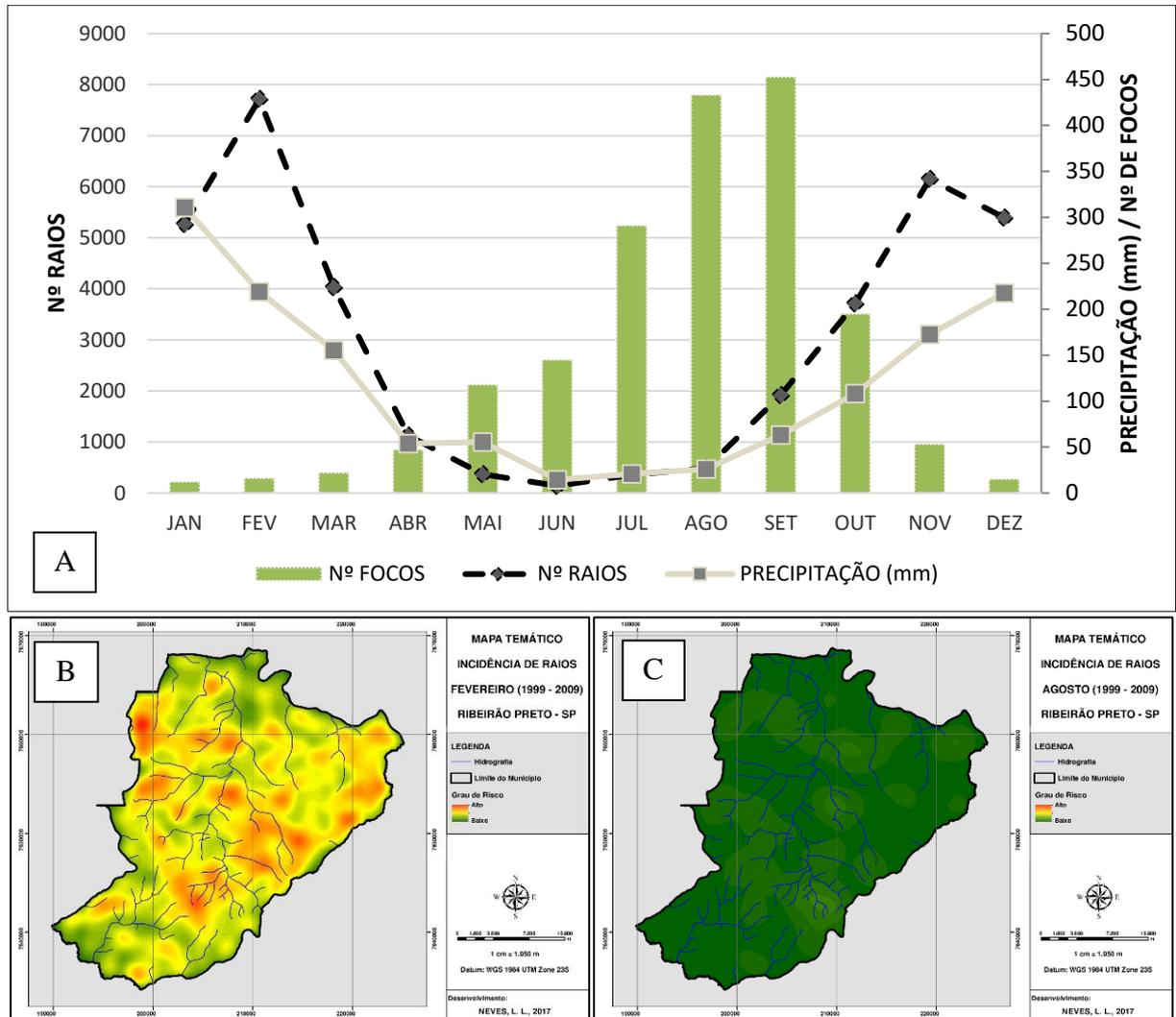


Figura 28. Gráfico da distribuição mensal do total de raios e da precipitação média entre 1999 e 2009 em Ribeirão Preto associada ao número de focos mensais registrados entre 1998 e 2016 (A); e mapas de densidade do total de raios para fevereiro (B) e agosto (C) para o mesmo período.

É possível observar a variação mensal dos focos de incêndio no município, que não parece estar diretamente relacionada com a variação da precipitação. Em setembro, por exemplo, mês com maior registro de focos no período (1998 – 2016) observamos que a precipitação não é a menor registrada. Entretanto, esta associação parece estar atrelada ao déficit hídrico acumulado dos meses anteriores (Figura 29). É possível observar que, no que diz respeito à precipitação, especificamente para o ano de 2015, agosto e setembro são os meses com maior déficit hídrico acumulado, o que explica o maior número de focos em setembro.

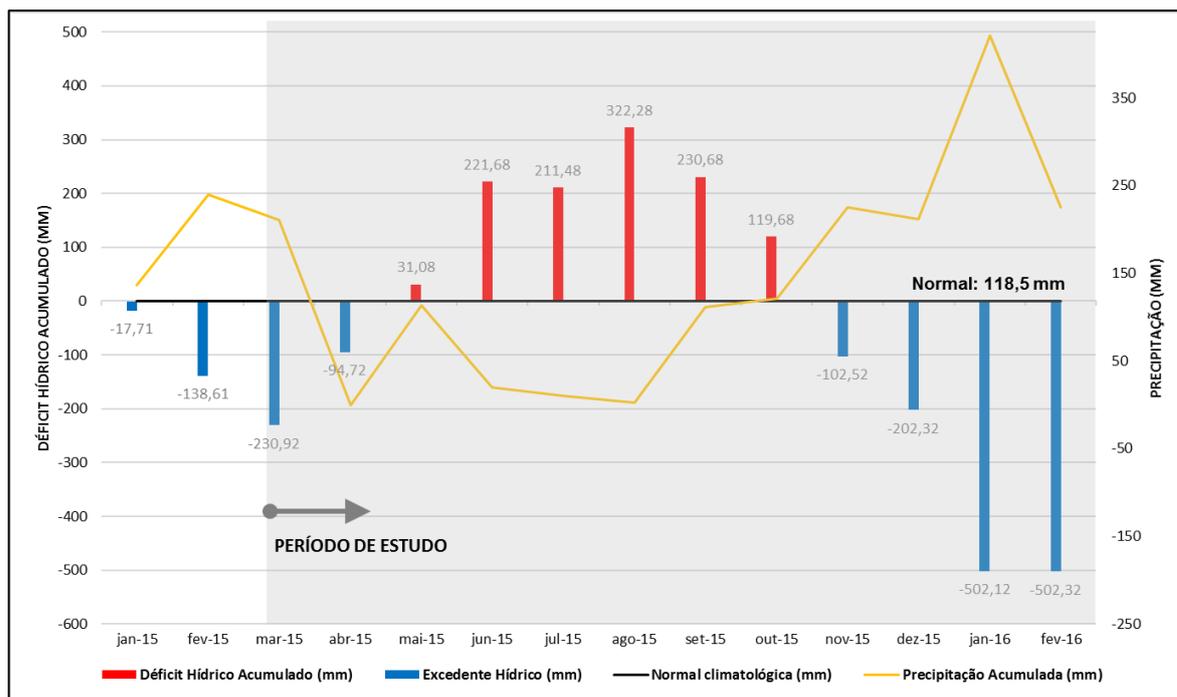


Figura 29. Gráfico da variação mensal do déficit/excedente hídrico e da precipitação acumulada no período de janeiro/2015 a fevereiro/2016 referente a estação meteorológica de Ribeirão Preto (centro).

A combinação dos indicadores de ignição pela aplicação da Equação 11 retornou os mapas mensais de suscetibilidade a combustão.

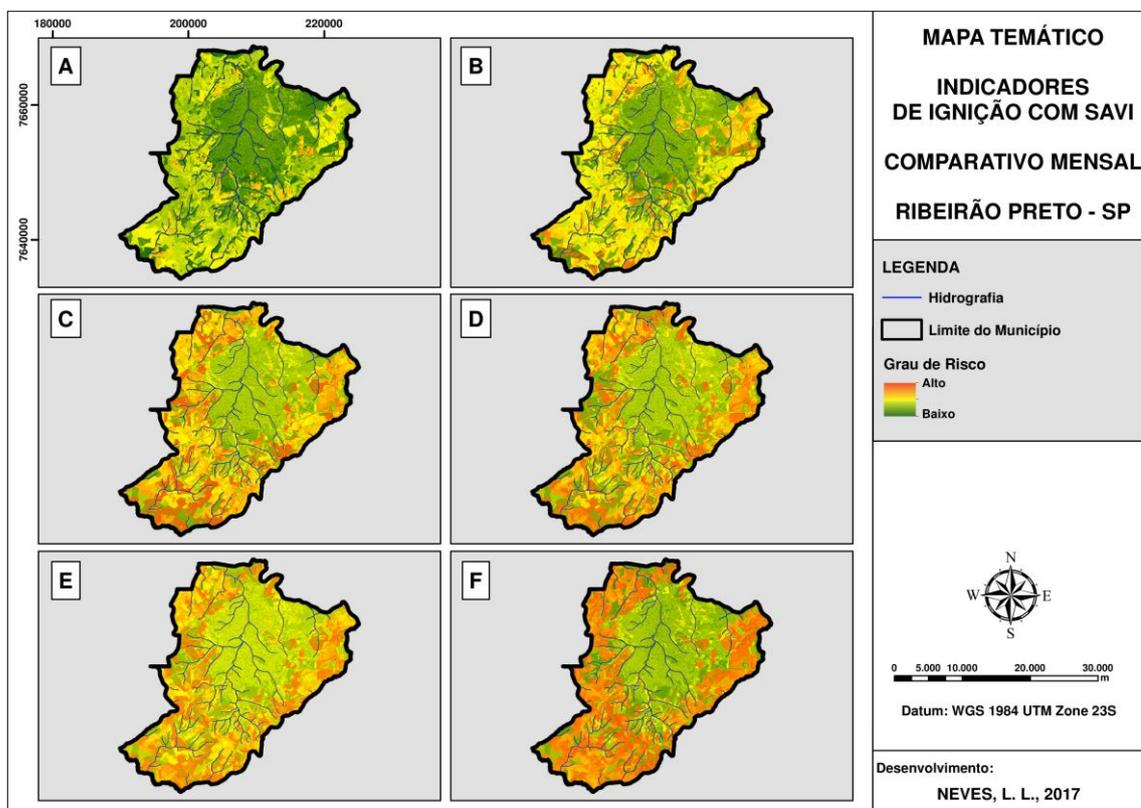


Figura 30. Progressão do grau de risco de incêndio em função dos indicadores de ignição nos meses com disponibilidade de imagens do SAVI – abril (A), maio (B), junho (C), julho (D), agosto (E) e outubro (F).

A Figura 30 ilustra esta evolução através dos resultados obtidos no modelo com uso do SAVI. A análise geral destes dados mensais ressalta o significativo aumento do grau de risco de incêndio nos períodos mais secos (julho – setembro).

4.2 Indicadores de propagação

O mapa de declividade de Ribeirão Preto mostra que o município pode ser considerado pouco acidentado, onde quase 90% de seu território não ultrapassa a classe dos 6° de declividade. Os maiores declives se restringem às áreas de calhas dos rios e à dois montes localizados na região nordeste do município, mas sem ultrapassar a marca dos 28° de declividade, como pode ser observado na Tabela 15 e na Figura 31.

Tabela 15. Resumo de áreas de cada classe de declividade.

Declividade (°)	Área (km ²)	%
0 - 6	579,81	88,95%
6 - 12	65,81	10,10%
12 - 24	5,48	0,84%
18 - 24	0,65	0,10%
> 24	0,09	0,01%
TOTAL	651,84	100,00%

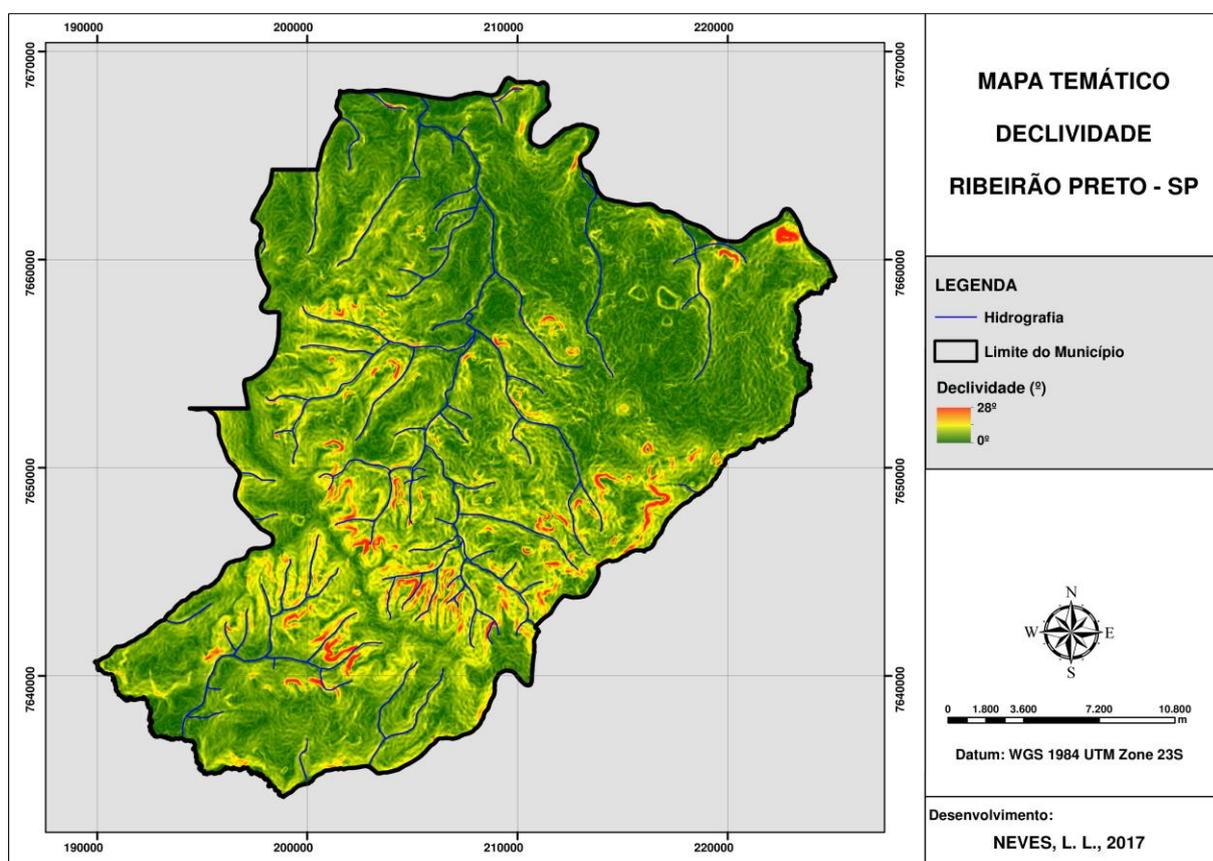


Figura 31. Mapa temático de declividade (°) do município de Ribeirão Preto – SP.

O mapa de exposição das vertentes é apresentado na Figura 32. As áreas em vermelho correspondem às vertentes voltadas para a direção nordeste, que apresentam maior grau de risco de incêndios segundo a metodologia apresentada no Item 3.2.7.

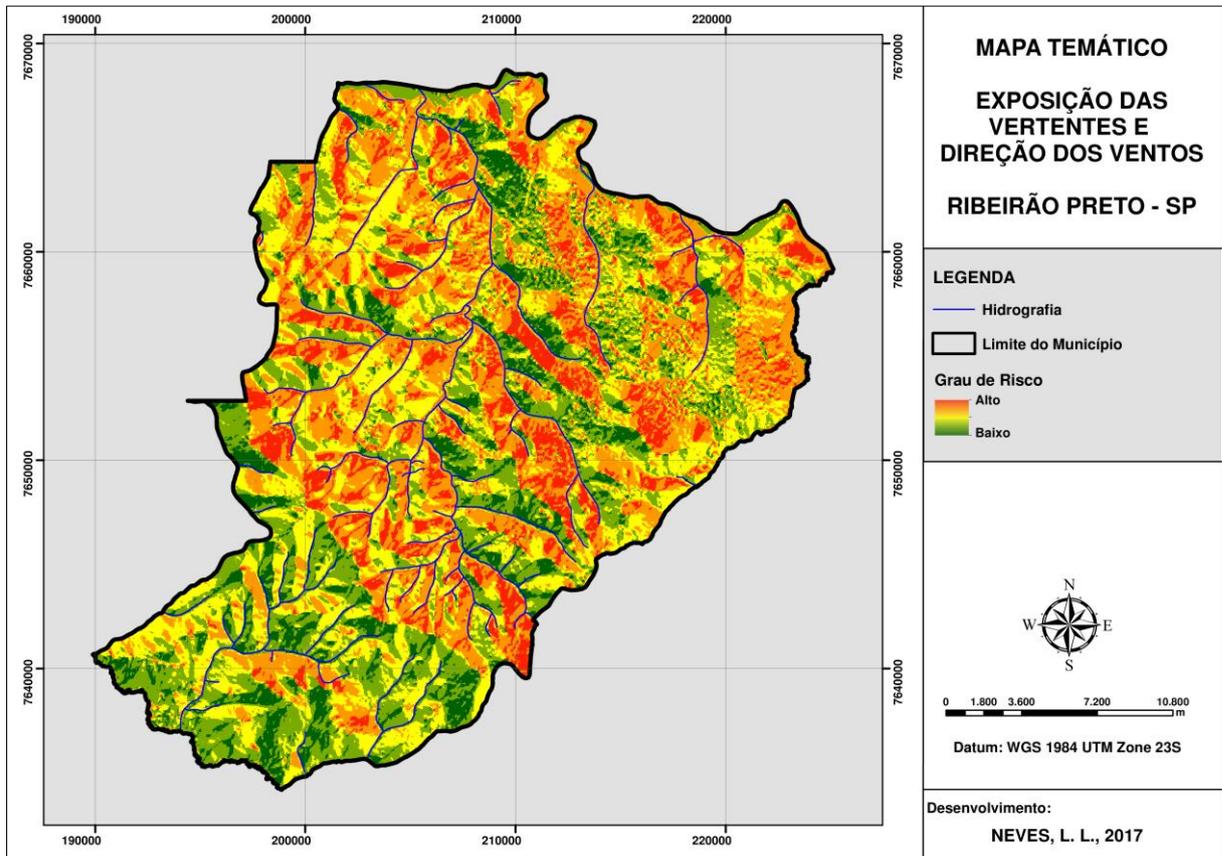


Figura 32. Mapa temático de exposição das vertentes associada à direção do vento predominante (NE) no município de Ribeirão Preto – SP.

A proporção resultante da multiplicação dos indicadores de propagação (Equação 12) assume que a medida que um declive aumenta, o risco de propagação do fogo aumenta em progressão geométrica (P.G.), a partir da constante do valor de risco da exposição e ventos, como pode ser observado na Figura 33.

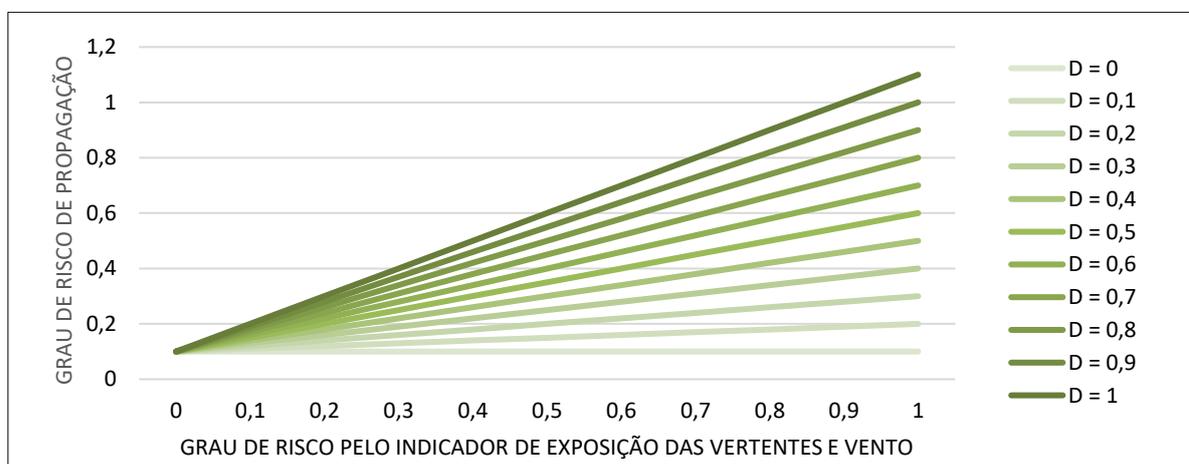


Figura 33. Proporcionalidade dada ao cálculo do grau de risco dos indicadores de propagação.

O mapa resultante deste cálculo é apresentado na Figura 34. É possível observar a presença de áreas mais suscetíveis à propagação do fogo, majoritariamente, na região centro-sul do município.

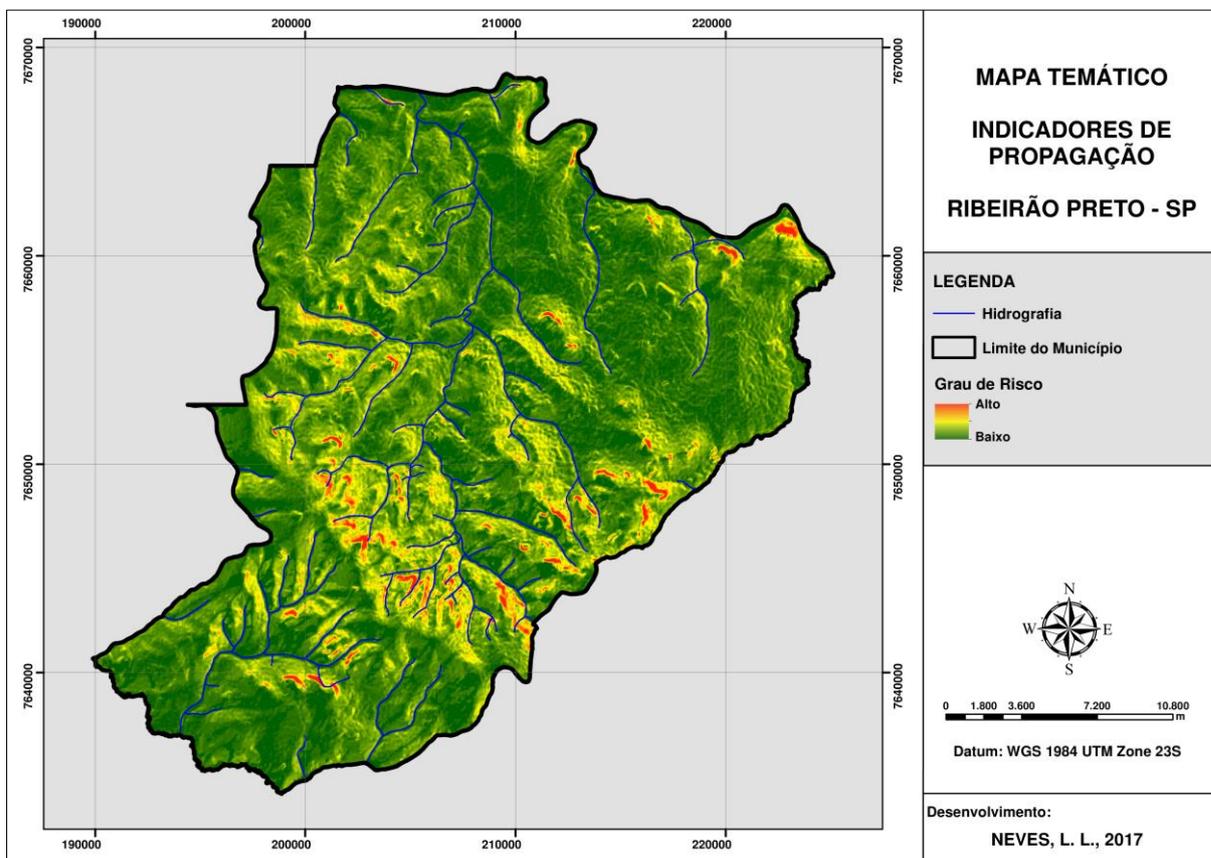


Figura 34. Mapa das áreas mais suscetíveis à propagação de um incêndio no município de Ribeirão Preto.

4.3 Modelo de Suscetibilidade a incêndios

A sobreposição dos indicadores de ignição e propagação através da Equação 13, onde é dado um peso de 90% para os indicadores de ignição e 10% para os indicadores de propagação, resulta no modelo final de suscetibilidade, separado em mapas mensais. As Figuras 35 e 36 representam o resultado amostral desta análise para os meses de abril e agosto (úmido e seco), respectivamente, em ambos os casos fazendo uso do SAVI. A comparação destes mapas ressalta o fato de que em meses mais secos, como agosto, a suscetibilidade de ocorrência de um incêndio é relativamente maior. Contrário ao que acontece em meses mais úmidos, como abril, onde a suscetibilidade a incêndios tende a ser menor.

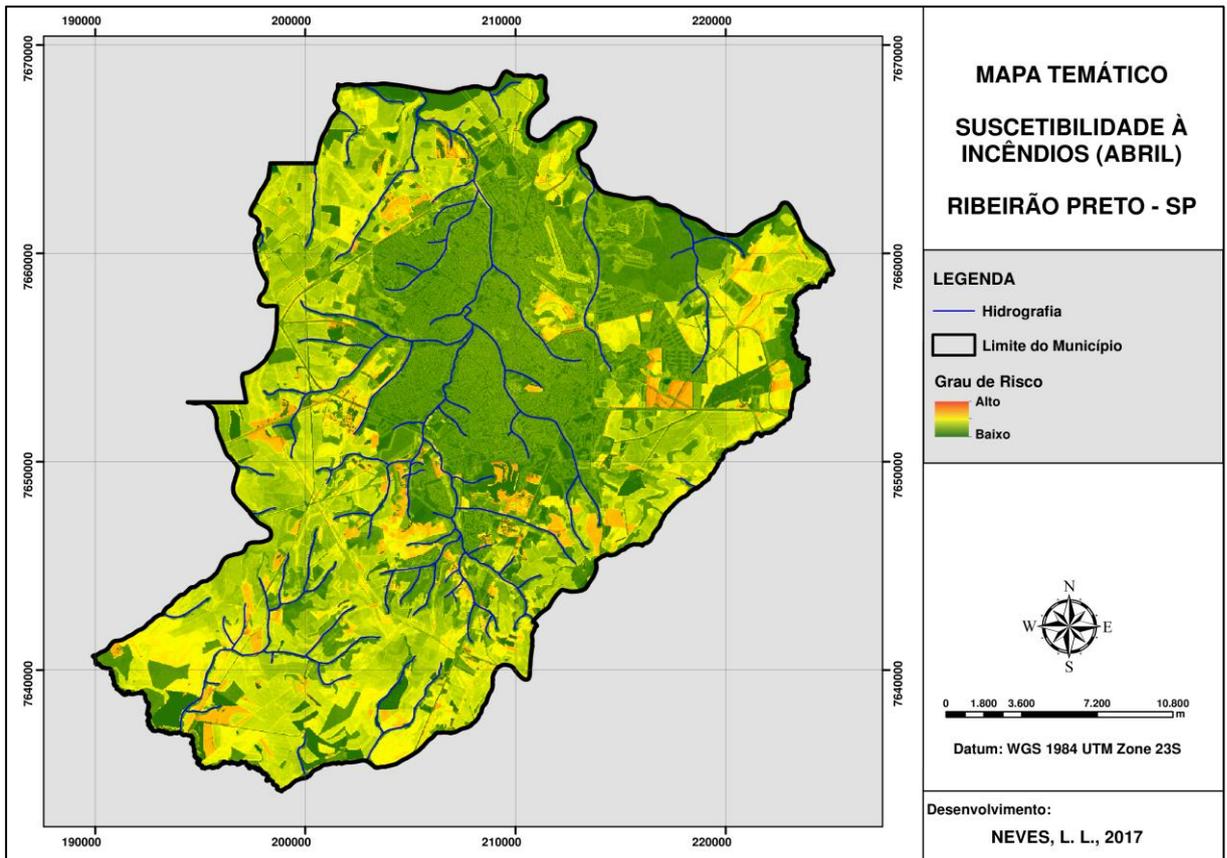


Figura 35. Mapa de suscetibilidade a incêndios em abril (com SAVI).

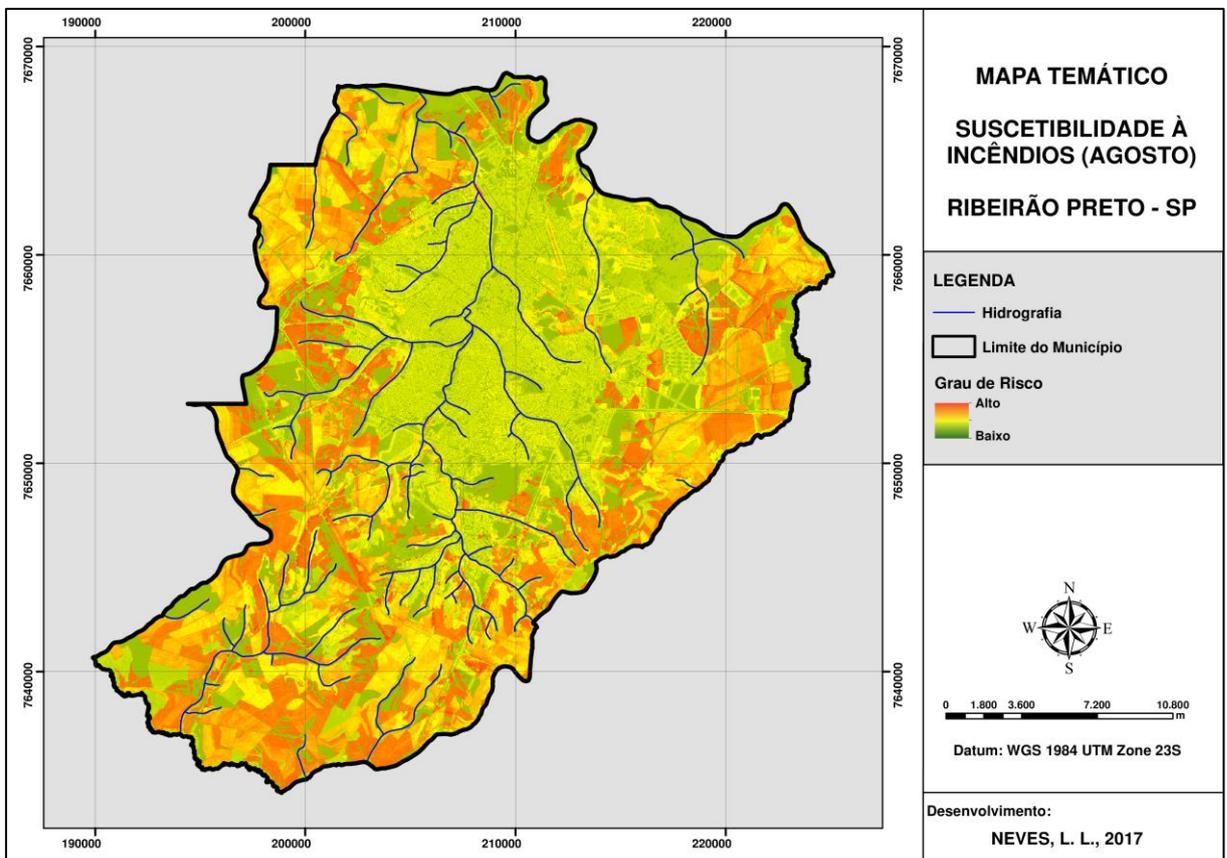


Figura 36. Mapa de suscetibilidade a incêndios em agosto (com SAVI).

A análise espacial dos resultados mostra que se deve atribuir mais atenção às regiões com predominância de cana-de-açúcar independente da época do ano, sendo este cuidado intensificado em períodos secos. Além disso, interpretando os dados em grande escala, é notória a influência da malha viária e corpos d'água, aumentando e diminuindo, respectivamente, o grau de risco em seu entorno. Este último ainda conta com a ponderação atribuída à vegetação em razão das áreas de preservação permanente (APP) do seu entorno, que devido ao seu menor estresse hídrico (maior biomassa), contribui para diminuir o risco de incêndios nestas áreas (Figura 37).

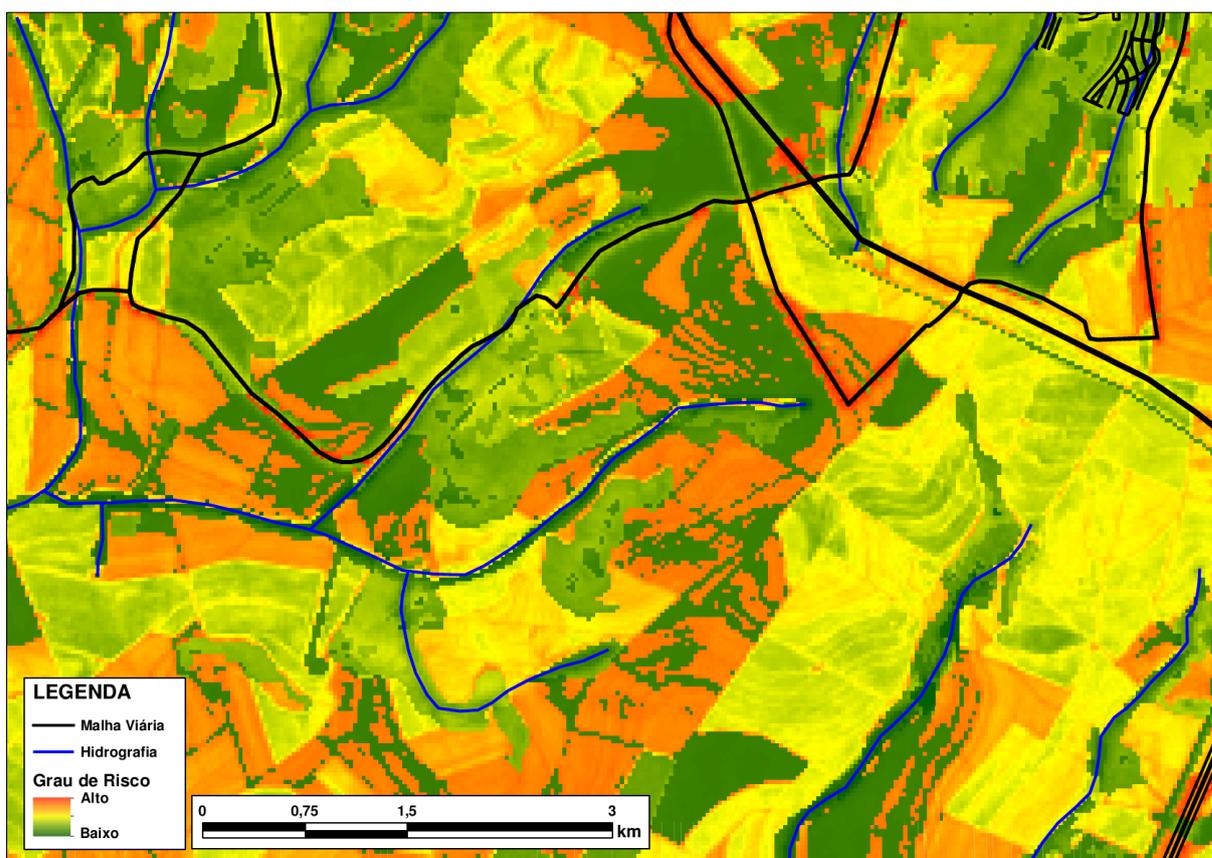


Figura 37. Detalhe do mapa de suscetibilidade à ocorrência de incêndios referente ao mês de agosto. Ressalta-se a influência da malha viária (em preto) e da hidrografia (em azul) no modelo (Escala 1:30.000).

Além disso, a associação do uso e ocupação da terra e do SAVI, reduziram significativamente a probabilidade de ocorrência de um incêndio em pontos de urbanização. Ainda que seja uma classificação de uso com intensa presença humana, fato ponderado pela acentuada presença de ruas e estradas, os pontos de urbanização não foram classificados como de grande risco de incêndio devido à baixa ocorrência de mecanismos de ignição e também à ausência de meios de propagação, ou em outras palavras, à existência de muitas feições que servem de bloqueadores do fogo. A Figura 38 traz um recorte do mapa de suscetibilidade à

ocorrência de incêndio, dando enfoque para o comparativo entre as áreas urbanizadas e sua região de entorno.

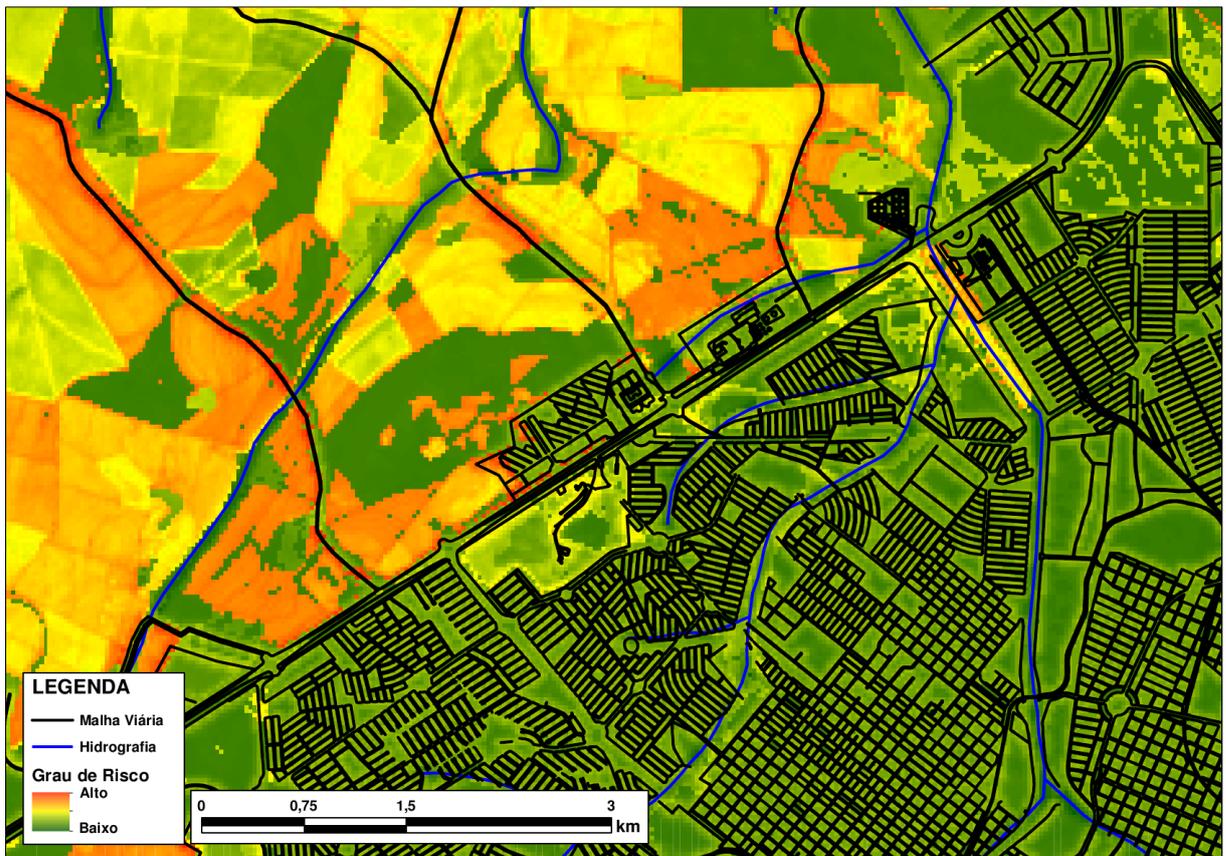


Figura 38. Detalhe do mapa de suscetibilidade à ocorrência de incêndios referente ao mês de agosto. Ressalta-se a comparação entre áreas urbanizadas e outras regiões de seu entorno (Escala 1:30.000).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de imagens de satélite de melhor resolução espacial (10m e 30m - melhor resolução quando comparada às imagens de satélites usuais para este tipo de análise, como NOAA ou MODIS, com resoluções espaciais de no mínimo 250m) permitiu uma análise mais detalhada do terreno, principalmente no que diz respeito à maior diferenciação de classes de uso e ocupação e interpretação do SAVI. Isto permite a aplicação do modelo em áreas de estudo que exigem uma escala mais detalhada, como em um município (conforme exemplo apresentado neste trabalho) ou ainda, em casos mais específicos, em um bairro. Entretanto, nem todos os indicadores utilizados no modelo estão disponíveis gratuitamente em uma resolução espacial considerada viável para esta escala. Ainda assim, vale ressaltar que hoje já existem imagens multiespectrais disponíveis comercialmente com resolução de até 30cm (WorldView-4). O mesmo ocorre com imagens de radar, que são encontradas com resolução de até 50cm (Pleiades 1-A ou GeoEye-1), mas que refletem em maiores custos ao interessado.

A análise da metodologia adotada e dos resultados encontrados nos permite concluir que a variação temporal do modelo se fez imprescindível para o êxito dos resultados. Isso se deu, em parte, pela grande variação do grau de risco encontrada entre meses secos e úmidos, fato atrelado aos índices de precipitação. Além disso, o estudo temporal das modificações das características e estágios da cana-de-açúcar e seus respectivos graus de combustibilidade também foram notáveis. Neste quesito, o SAVI se destacou como um diferencial do trabalho pois nos permitiu avaliar temporalmente estes diferentes estágios de cana-de-açúcar e relacioná-las com a suscetibilidade a incêndios. Este é um fator extremamente relevante para municípios em que este tipo de cultura é predominante, como é o caso de Ribeirão Preto e muitos outros da região centro-sul do país. Os resultados comprovaram as notórias diferenças da análise do SAVI em diferentes períodos, explicada pela dinâmica dos estágios da cana-de-açúcar.

Além de analisar a variação temporal da cultura agrícola predominante na região, o trabalho também ressaltou a variação da precipitação e da incidência de raios ao longo dos meses, sendo esta primeira de papel fundamental na ocorrência de incêndios, justificada pela alta ponderação dada a ela (Equação 11). Trabalhar com o déficit hídrico acumulado do período anterior ao mês de referência se mostrou uma boa forma de avaliar a dinâmica temporal de precipitação no modelo. Setzer e Sismanoglu (2012), em sua metodologia de cálculo do risco de fogo, ressaltam a importância de se considerar os dias sem chuva anteriores ao período de estudo em um modelo de análise de risco. O índice criado pelos autores poderia ser implementado no modelo apresentado neste trabalho de forma a considerar os chamados dias

de “Secura”, a umidade relativa e a temperatura máxima, com a vantagem de poder analisar os dados em uma escala municipal (considerada de alta resolução espacial em comparação à resolução adotada pelos autores mencionados).

De uma forma geral, concluímos que o modelo é viável mas carece de aprimoramento contínuo, principalmente no que diz respeito à coleta de dados atualizados. Alguns indicadores demandam levantamento em tempo real, como é o caso da direção do vento e precipitação que se alteram continuamente em um curto período de tempo.

Com o objetivo de servir como uma ferramenta de gestão pública, este trabalho busca, por meio de seu aperfeiçoamento, implementar o modelo de forma efetiva, junto com órgãos do governo e defesa civil. Um plano de mitigação de fogo pode incluir a difusão de avisos, o estabelecimento de limitações a certas atividades recreativas ao ar livre ou o planejamento de ações de vigilância e prevenção. Segundo Onigemo (2007) com as informações oferecidas pelos mapas de risco de incêndio gerados a partir do SIG, várias medidas podem ser tomadas, como maior vigilância nas áreas de riscos, restrições de acesso a estes locais, construções de aceiros preventivos e reorganização de práticas de manejo como corte, desbaste e limpeza. Neste contexto, a determinação do risco de incêndio a partir do SIG é um instrumento viável para auxiliar o planejamento da prevenção e combate (ROOSE et al., 1998 apud ONIGEMO, 2007). Ademais, esta implementação também poderá ser feita por meio de um software que consiga assimilar em tempo real os indicadores (parâmetros de entrada) e gerar os mapas de suscetibilidade continuamente. Este acompanhamento é importante para gerar estatísticas de locais com maior suscetibilidade, de forma a conscientizar a população e os órgãos do governo sobre estas áreas e possibilitar que os investimentos na prevenção e controle dos incêndios no município sejam feitos de forma mais efetiva.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUADO, I. et al. Estimation of dead fuel moisture content from meteorological data in Mediterranean areas. Applications in fire danger assessment. **International Journal of Wildland Fire**, 16, 2007. 390-397.

AGUADO, I.; CAMIA, A. Fundamentos y utilización de índices meteorológicos de peligro de incendio. **Serie Geográfica**, 7, 1998. 49-58.

ALVES, K. M. A. D. S.; NÓBREGA, R. S. Uso de dados climáticos para análise espacial de risco de incêndio florestal. **Mercator**, Fortaleza, 10, n. 22, 2011.

ALBALADEJO, F. S.; Desenvolvimento de uma unidade de gerenciamento eletrônico para motores de combustão interna do ciclo otto. Dissertação de mestrado. **Universidade de São Paulo**, 2013.

ANDRADE, C. F. S.; ARAÚJO, S. B. D.; VELLOSO, S. L. Podem as bitucas de cigarro iniciar incêndios na beira da rodovia Rio-Santos (BR-101), região de Paraty? **Educação Ambiental**, 2, 2009. 62-70.

ANTUNES, J. F.; AZANIA, C. A. M.; AZANIA, A. A. P. M. Impactos ambientais das queimadas de cana-de-açúcar. **Grupo Cultivar**. Disponível em: <<http://www.grupocultivar.com.br/artigos/impactos-ambientais-das-queimadas-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 23 Julho 2017.

BARBOSA, K. M. D. N. Monitoramento espacial de biomassa e carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central. **Programa de pós graduação em engenharia florestal**, Curitiba, Junho 2006. 1-131.

BATISTA, A. C. Mapas de risco: uma alternativa para o planejamento de controle de incêndios florestais. **Revista Floresta**, Curitiba, 30, n. 1, 2000. 45-54.

BORATTO, I. M. D. P.; GOMIDE, R. L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, Abril 2013. 7345-7352.

BRASILAGRO. Alerta no campo. Disponível em: <<http://www.brasilagro.com.br/conteudo/alerta-no-campo.html#.WgwwxmhSxPY>>. Acesso em 15 novembro 2016

BROWN, A. A.; DAVIS, K. P. **Forest fire: control and use**. 2. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1973.

CALIJURI, M. L.; LOURES, S. S. P. Fundamentos de sistemas de informações geográficas. **Programa de pós graduação em engenharia civil**, Viçosa, Maio 2006.

CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J. Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral. **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 1998. 59-82.

CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas aplicadas a Agricultura. **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em: <<http://www.cepagri.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 22 Julho 2017.

CASTRO, L. Colheita da cana já é totalmente mecanizada na região de Ribeirão Preto. **A CIDADE ON**. 2016. Disponível em: <<https://www.acidadeon.com/ribeiraopreto/economia/NOT,2,2,1161963,Colheita+da+cana+ja+e+totalmente+mecanizada+na+regiao+de+Ribeirao+Preto.aspx>>. Acesso em 30 Outubro 2016.

CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. Mapping and inventory of forest fires from digital processing of tm data. **Geocarto International**, 3, Setembro 1988. 41-53.

CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. **REMOTE SENS. ENVIRON.**, 29, 9 Junho 1989. 147-159.

COISSI, J. Região de Ribeirão Preto (SP) tem 30% das queimadas do Estado. **Folha de São Paulo**, 2013. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/ribeiraopreto/2013/09/1349322-regiao-de-ribeirao-preto-sp-tem-30-das-queimadas-do-estado.shtml>>. Acesso em: 22 Janeiro 2017.

COUTINHO, L. M. O bioma do cerrado. **Eugen Warming e o cerrado brasileiro: um século depois**, São Paulo, 2002. 77-91.

CPN/SP. **Norma regulamentadora N° 10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade**. Comissão Tripartite Permanente de Negociação do Setor Elétrico no Estado de SP. p. 231-241. 2004.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J. An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the US NLDN. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2009. 499-518.

DAVIS, C.; CÂMARA, G. Arquitetura de sistemas de informação geográfica. **INPE**, São José dos Campos, 2001. 1-35.

ELAT. Grupo de Eletricidade Atmosférica. INPE. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage>>. Acesso em 16 Julho 2017.

ENGESAT. Landsat 8. **ENGESAT**. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/landsat-8/>>. Acesso em: 15 Junho 2017.

ESA. **Sentinel-2 User Handbook**. European Space Agency. p. 1-64. 2015.

FAO. **Global Forest Fire Assessment 1990-2000**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 2001.

FAO. **A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, p. 1-30. 2007.

FERNANDES, T. Incêndios florestais crescem na região de Ribeirão Preto. **Folha de São Paulo**, Ribeirão Preto, 19 Setembro 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/ribeiraopreto/2014/09/1518222-incendios-florestais-crescem-na-regiao-de-ribeirao-preto.shtml>>. Acesso em: 22 Janeiro 2017.

FERRAZ, S. F. D. B.; VETTORAZZI, C. A. Mapeamento de risco de incêndios florestais por meio de sistema de informações geográficas (SIG). **SCIENTIA FORESTALIS**, Piracicaba, n. 53, Junho 1998. 39-48.

FERREIRA, A. R. R. Sistema de Informação Geográfica e Susceptibilidade a Incêndio Florestal., 2010.

FILHO, M. Incêndio em Portugal gera debate sobre o eucalipto, um dos motores econômicos do Brasil. **BBC**, Lisboa, 25 Junho 2017. Disponível em: <<http://www.bbc.com/portuguese/brasil-40376855>>. Acesso em: 29 Julho 2017.

FLANNIGAN, M. D.; WOTTON, B. M. Fire regime and the abundance of Jack Pine. **2º Int. Conf. Forest Fire Research**, Coimbra, II, Nov 1994. 625-636.

FOLHA DE SÃO PAULO. Região de Ribeirão Preto é a que mais queima cana em São Paulo. 2014. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/cana/colheita/regiao-ribeirao-preto-queima-cana-300414/>>. Acesso em: 30 Outubro 2016.

FORMAN, R. T. T.; COLLINGE, S. K. Nature conserved in changing landscapes with and without spatial planning. **Landscape and Urban Planning**, 37, n. 1-2, Junho 1997. 129-135.

FURB. O Fogo. **Universidade Regional de Blumenau**, 2015. Disponível em: <<http://www.furb.br/monitoramentoflorestal/lampf.html>>. Acesso em: 22 Novembro 2016.

G1. Mais de quatro mil incêndios são registrados no Maranhão. **globo.com**, 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/2016/10/mais-de-quatro-mil-incendios-sao-registrados-no-maranhao.html>>. Acesso em: 13 Dezembro 22.

GONÇALVES, K. S.; CASTRO, H. A.; HACON, S. S. As queimadas na região amazônica e o adoecimento respiratório. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, 17, n. 6, Junho 2012. 1523-1532.

GOVERNO DE MATO GROSSO. Geografia. **Governo de Mato Grosso**. Disponível em: <<http://www.mt.gov.br/geografia>>. Acesso em: 11 Fevereiro 2017.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, 25, n. 3, Agosto 1988. 295-309.

IBGE. **CENSO DEMOGRÁFICO**, 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>.

- IBGE. **CIDADES**, 2016. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=354340>>.
- ICMBIO. ICMBIO intensifica ações de combate a incêndios. **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**, 2014. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/ultimas-noticias/4-destaques/4918-icmbio-intensifica-acoes-de-combate-a-incendios>>. Acesso em: 14 Maio 2017.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**, 1992. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 15 Outubro 2016.
- JACQUES, A. V. A. A queima das pastagens naturais: efeitos sobre o solo e a vegetação. **Ciencia Rural**, Santa Maria, 33, n. 1, jan-fev 2003. 177-181.
- JAISWAL, R. K. et al. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 4, n. 1, Agosto 2002. 1-10.
- JULIÃO, R. P. et al. **Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal**. Autoridade Nacional de Protecção Civil. [S.l.]. 2009.
- KAYLL, A. J. In: WHELAN, R. J. **The Ecology of Fire**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- KOPROSKI, L. et al. Modelo de zoneamento de risco de incêndios para unidades de conservação brasileiras: O caso do Parque Estadual do Cerrado (PR). **Revista Floresta**, Curitiba, 41, n. 3, Julho / Setembro 2011. 551-562.
- LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. Análise Comparativa entre os modelos digitais de elevação ASTER, SRTM e TOPODATA. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, 2011. 4003-4010.
- LINO, A. G. Composição química e estrutural da lignina e lipídios do bagaço e palha da cana-de-açúcar. **Programa de pós graduação em agroquímica**, Viçosa, 2015.
- MARCUSSI, A. B. et al. Utilização de índices de vegetação para os sistemas de informação geográfica. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, 11, n. 35, 2010. 41-53.
- MMA. O Bioma Cerrado. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>>. Acesso em: 14 Janeiro 2017.
- NACCARATO, K. P. Análise das características dos relâmpagos na Região Sudeste do Brasil. **INPE**, São José dos Campos, 2006.
- OLIVEIRA, B. S. Satélites e Sensores. **INPE**, São José dos Campos, Julho 2016.

OLIVEIRA, D. D. S. D. Zoneamento de risco de incêndios em povoamentos florestais no norte de Santa Catarina. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**, Curitiba, 2002.

ONIGEMO, A. E. Avaliação de índices de risco de incêndio em áreas com predominância de gramíneas cespitosas na sub-região da Nhecolândia, Pantanal, MS. **UFMS**, Campo Grande, 2007.

PEREIRA, C. A.; FIEDLER, N. C.; MEDEIROS, M. B. Análise de ações de prevenção e combate aos incêndios florestais em unidades de conservação do cerrado. **Revista Floresta**, Curitiba, Mai/Ago 2004. 95-100.

PIOLI, A.; MP propõe ação civil por combate a incêndios na Mata de Santa Tereza. G1. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/noticia/2014/09/mp-propoe-acao-civil-por-combate-incendios-na-mata-de-santa-tereza.html>>. Acesso em: 15 novembro 2016

PREFEITURA MUNICIPAL DE RIBEIRÃO PRETO. Secretaria do Planejamento e Gestão Pública. **Mapa Viário Geral da Cidade e Distrito**, 2010.

RAMME, F. L. P.; LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V. Perfis temporais NDVI MODIS, na cana-soca, de maturação tardia. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, 30, n. 3, Maio / Junho 2010. 480-494.

RIBEIRO, H. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, 42, n. 2, Abril 2008. 370-376.

RIBEIRO, H.; ASSUNÇÃO, J. V. Efeitos das queimadas na saúde humana. **Estudos Avançados**, São Paulo, 16, n. 44, Abr 2002. 125-148.

RIBEIRO, L. et al. Zoneamento de riscos de incêndios florestais para a fazenda experimental do Canguiri, Pinhais (PR). **Revista Floresta**, Curitiba, 38, n. 3, Julho / Setembro 2008. 561-572.

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

RIVERA-LOMBARDI, R. J. Identificação de áreas vulneráveis à ocorrência de incêndios florestais, provocados por atividades antrópicas, utilizando diferentes métodos de inferência espacial. **Anais X SBSR**, Foz do Iguaçu, Abril 2001. 963-965.

RODRIGUES, R. P.; BORGES, E. F.; FRANCA-ROCHA, W. J. S. Identificação das zonas de ocorrência de incêndios no Parque Nacional da Chapada Diamantina - BA. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, Abril 2011. 8043-8050.

SALAS, J.; CHUVIECO, E. Geographic information systems for wildland fire risk mapping. **Wildfire**, Fairfield, Junho 1994. 7-18.

SANTOS, A. R. D. Geomática aplicada à gestão de recursos hídricos. **Universidade Federal do Espírito Santos (UFES)**, 1998.

SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, São Paulo, 35, n. 5, 2012. 1004-1010.

SETZER, A. W.; SISMANOGLU, R. A. Risco de Fogo: Metodologia do Cálculo – Descrição sucinta da Versão 9. **INPE**, São José dos Campos, Outubro 2012.

SILVEIRA, A. H. D. M. et al. Proposta Metodológica para risco de incêndio florestal: Estudo de caso na zona de proteção ambiental (ZPA-1) em Natal/RN. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 6, n. 5, Setembro 2013. 1174-1192.

SOARES, R. V. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1984 a 1987. **Revista Floresta**, Curitiba, 18, n. 1/2, 1988. 94-121.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; SANTOS, J. F. Evolução do perfil dos incêndios florestais em áreas protegidas no Brasil, de 1983 a 2002. **Revista Floresta**, Curitiba, 36, n. 1, 2006. 93-100.

SOARES, R. V.; SANTOS, J. F. Perfil dos incêndios florestais no Brasil de 1994 a 1997. **Revista Floresta**, Curitiba, 32, n. 2, Novembro 2002. 219-232.

USGS. **Landsat - Earth Observation Satellites**. U.S. Geological Survey. 2015.

USGS. U.S. Geological Survey. **Landsat Missions**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/about-landsat>>. Acesso em: 26 Abril 2017.

VALERIANO, M. D. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Abril 2005. 3595-3602.

VETORAZZI, C. A. Geoprocessamento é fundamental no controle de incêndios. **MundoGEO**, 16 Agosto 2001. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2001/08/16/geoprocessamento-e-fundamental-no-controle-de-incendios/>>. Acesso em: 25 Maio 2017.

VIRO, P. J. Effects of forest fire on soil. In: KOZLOWSKI, T. T.; AHLGREN, C. E. **Fire and Ecosystems**. Nova Iorque: Academic Press, 1974. Cap. 2, p. 7-45.

WHELAN, R. J. **The ecology of fire**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, A. S. Análise da precipitação e sua influência na ocorrência de incêndios florestais no Parque Nacional Serra de Itabaiana, Sergipe, Brasil. **Ambiente & Água**, Taubaté, 6, n. 1, 2011. 148-156.