



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA
DIVISÃO DE AGRICULTURA
ENGENHARIA FLORESTAL

**APLICAÇÃO DA MODELAGEM FUZZY NA AVALIAÇÃO DO RISCO DE
OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NO PARQUE NACIONAL DA
GORONGOSA**

Monografia científica apresentada e defendida como requisito para a obtenção do grau de
Licenciatura em Engenharia Florestal

Autor: Álvaro Alex Jorge Uamusse

Tutor: dr. Arão Raimundo Finiassel (MSc)

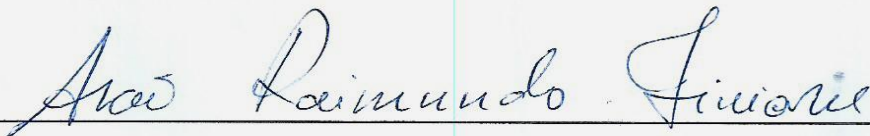
Lionde, Novembro de 2022




INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

Monografia científica sobre: **Aplicação da Modelagem Fuzzy na Avaliação do Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais no Parque Nacional da Gorongosa**, apresentada ao Curso de Engenharia Florestal na Divisão de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Florestal.

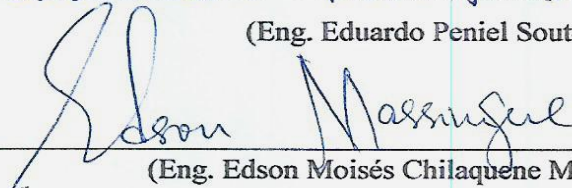
Projecto Final defendido e aprovado no dia 17 de Novembro de 2022



(dr. Arão Raimundo Finiasse, MSc)



(Eng. Eduardo Peniel Souto, MSc)



(Eng. Edson Moisés Chilaquene Massingue, MSc)

Lionde, Novembro de 2022

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABELAS.....	v
ÍNDICE DE FUNÇÕES	v
LISTA DE ABREVIATURAS	vi
DECLARAÇÃO	vii
DEDICATÓRIA	viii
AGRADECIMENTOS	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.2. Delimitação do Problema e Justificação	2
1.3. Objectivos	3
1.3.1. Objectivo Geral.....	3
1.3.2. Objectivos Específicos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Fogo e Incêndios Florestais.....	4
2.2. Agentes de Influência à Ocorrência de Incêndios.....	5
2.2.1. Presença Humana.....	5
2.2.2. Material Combustível.....	5
2.2.3. Uso e Cobertura da Terra	6
2.2.4. Topografia.....	7
2.2.5. Clima.....	7
2.3. Modelos e Modelagem.....	8
2.3.1. Modelagem <i>Fuzzy</i>	10
2.3.2. Modelos de Sistema <i>Fuzzy</i>	11
3. METODOLOGIA	13

3.1. Descrição do Parque Nacional da Gorongosa.....	13
3.1.1. Localização e Superfície	13
3.1.5. Vegetação do PNG.....	17
3.1.6. Fauna do PNG.....	18
3.2. Materiais e Métodos.....	19
3.2.1. Materiais	19
3.2.2. Métodos.....	19
3.2.3. Base de dados.....	20
3.2.4. Pré-Processamento (Geração das Variáveis de Estudo).....	21
3.2.4.1.1. Validação do Mapa de Uso e Ocupação da Terra	22
3.2.4.1.2. Reclassificação dos Valores do Mapa de Uso e Ocupação da Terra	22
3.2.4.2. Declividade e Orientação do Relevo.....	24
3.2.4.3. Proximidade à Estradas.....	25
3.2.4.4. Proximidade às Zonas Habitacionais	25
3.2.5. Processamento das Variáveis (Modelagem <i>fuzzy</i>)	25
3.2.5.1. Fuzzyficação das Variáveis de Estudo.....	25
3.2.5.2. Defuzzyficação das Variáveis e Validação do Mapa de ROIF	28
3.2.5.3. Cálculo de Áreas	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Uso e Ocupação da Terra.....	30
4.1.1. Validação do Mapa de Uso e Ocupação da Terra	32
4.1.2. Fuzzyficação da Variável Uso e Ocupação da Terra	33
4.2. Declividade	34
4.2.1. Fuzzyficação da Variável Declividade.....	36
4.3. Orientação do Relevo.....	37
4.3.1. Fuzzyficação da Variável Orientação do Relevo	39
4.4. Proximidade às Estradas	41

4.4.1. Fuzzyficação da Variável Proximidade às Estradas.....	42
4.5. Proximidade às Zonas Habitacionais	43
4.5.1. Fuzzyficação da Variável Proximidade às Zonas Habitacionais	46
4.6. Defuzzyficação das Variáveis	47
4.6.1. Validação do Mapa de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais do PNG	50
5. CONCLUSÕES	52
6. RECOMENDAÇÕES	53
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	54
ANEXOS	57
Anexo I: Evidência da ocorrência de incêndios no PNG	57
Anexo II: Área de proteção total do PNG	59
Anexo III: Evidência da existência de comunidades e sua relação com incêndios no PNG.....	60
Anexo IV: Inquérito para a aquisição de informações adicionais no campo	61
Anexo V: Estrutura metodológica para a realização do presente trabalho	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Triângulo do Fogo	4
Figura 2: Classificação dos Modelos	10
Figura 3: Funções de pertinência dos conjuntos Fuzzy	11
Figura 4: Esquema do Raciocínio na Modelagem Fuzzy	12
Figura 5: Mapa de Localização do Parque Nacional da Gorongosa	13
Figura 6: Mapa topográfico do Parque Nacional da Gorongosa.....	14
Figura 7: Precipitação Média Anual do Parque Nacional da Gorongosa	16
Figura 8: Mapa dos tipos de vegetação do Parque Nacional da Gorongosa.....	18
Figura 9: Mapa de Uso e Ocupação da Terra do PNG	31
Figura 10: Efeito da função Fuzzy Gaussian no Uso e Ocupação da Terra do PNG	33
Figura 11: Mapa de Declividade do Terreno do PNG	35
Figura 12: Efeito da Função Fuzzy Large na Declividade do Terreno do PNG.....	37
Figura 13: Mapa de Orientação do Relevo do PNG	39
Figura 14: Efeito da Função Fuzzy Large na Orientação do Relevo do PNG.....	40
Figura 15: Mapa de Proximidade às Estradas (Distância euclidiana).....	42
Figura 16: Efeito da Função Fuzzy Small na Proximidade às Estradas do PNG	43
Figura 17: Mapa de Proximidade às Zonas Habitacionais (distância euclidiana)	45
Figura 18: Efeito da Função Fuzzy Small na Proximidade às Zonas Habitacionais do PNG	46
Figura 19: Mapa de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais no PNG.....	49
Figura 20: Sobreposição dos focos de fogo ocorridos de 01/01/2022 a 06/10/2022 ao mapa de risco no Parque Nacional da Gorongosa.....	51
Figura 21: Ocorrência e propagação do fogo não planejado (A e C);Emissões de gases tóxicos (B)	57
Figura 22: Áreas devastadas pelo Fogo não controlado (D, E e F).	58
Figura 23: Santuário do PNG (A), Áreas de pastagem (B e C)	59
Figura 24: Foto aérea da comunidade de Chipondaminga (A) e vestígios da ocorrência de fogo ao longo da via de acesso (B).	60
Figura 25: Fase I do Processamento (Geração das Variáveis de Estudo).....	62
Figura 26: Fase II do Processamento das variáveis aplicando a modelagem fuzzy (análise de sobreposição fuzzy)	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Valores de Reclassificação das Classes de Uso e ocupação da Terra do PNG.....	23
Tabela 2: Valores de Reclassificação dos aspectos da orientação do relevo	24
Tabela 3: Matriz confusão do processo de avaliação da exatidão da classificação (Índice Kappa)	32
Tabela 4: Classes dos graus de Declividade e suas respectivas áreas.....	35
Tabela 5: Classes da Orientação do Relevo e suas respectivas áreas.	38
Tabela 6: Área de influência pela rede viária do PNG	41
Tabela 7: Áreas de influência directa das Zonas Habitacionais do PNG	44
Tabela 8: Quantidade de Área em função do Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais no PNG	48
Tabela 9: Níveis de Influência das Variáveis de Entrada ao Alto Risco no Mapa ROIF.....	49
Tabela 10: Relação das classes de risco do Mapa ROIF com a ocorrência de incêndios no PNG50	

ÍNDICE DE MODELOS

Modelo1: Cadeia de Markov	9
Modelo 2: Modelo logístico de difusão	9
Modelo 3: Modelo logístico de difusão.. ..	9
Modelo 4: Operador <i>FUZZY Gamma</i>	28

ÍNDICE DE FUNÇÕES

Função 1: <i>FUZZY Gaussian</i>	26
Função 2: <i>FUZZY Large</i>	26
Função 3: <i>FUZZY Large</i>	27
Função 4: <i>FUZZY Small</i>	27

LISTA DE ABREVIATURAS

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer

BR - Boletim da República

BD - Banco de Dados

GM - Governo de Moçambique

GPS – Global Positioning System

MDE - Modelo Digital de Elevação

MICOA - Ministério Para a Coordenação da Acção Ambiental

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

PNG - Parque Nacional da Gorongosa

RIF - Risco de Incêndios Florestais

ROIF – Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission

VIIRS – Visible Infrared Imager Radiometer Suite

WGS – World Geodetic System

WWF – World Wildlife Fund



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

DECLARAÇÃO

Declaro por minha honra que este Trabalho de Culminação do Curso, é resultado da minha investigação pessoal e das orientações do (s) meu (s) tutor (es), o seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto, nas notas e na bibliografia final. Declaro ainda que este trabalho não foi apresentado em nenhuma outra instituição para propósito semelhante ou obtenção de qualquer grau académico.

Lionde, _____ de _____ de _____

(Álvaro Alex Jorge Uamusse)

DEDICATÓRIA

Aos meus Pais:

-Eterno Pai Jorge Agostinho Uamusse (Em memória)

-Judite Eugénio (Querida Mãe)

-Eugénio Rosa Matsinhe (Segundo pai)

-Euzéria Mabasso (Querida segunda Mãe)

Às minhas Irmãs:

-Édma Judite Eugénio Matsinhe, Arcélia Judite Jorge Uamusse e Amélia Judite Jorge Uamusse.

= Dedicado =

AGRADECIMENTOS

Ao criador do céu e da terra (Deus), pela vida e sustento.

À família Uamusse e Matsinhe pelo amor incondicional, ensinamentos, apoio e paciência em todos os momentos.

Ao dr. Arão Raimundo Feniase (meu tutor), pela inspiração, ensinamentos, apoio, incentivo, paciência, dedicação, disponibilidade e por acreditar em meu potencial.

Ao Instituto Superior Politécnico de Gaza e a todo o corpo docente que contribuíram para a minha formação, em especial para o curso de Engenharia Florestal: Eng. Edson Massingue, Prof. Dr. Mário Tuzine, Eng. Emídio Matusse, Eng. Severino Macoô, dr. Sérgio Bila, Eng. Pedro Wate, Eng. Juvência Malate e Eng. Jeremias Agapito (em memória).

Ao Parque Nacional da Gorongosa, pela colaboração no acto de aquisição de dados e informações relevantes da área de estudo, em especial ao Dr Marc Stalmans (diretor dos serviços científicos), Margarida Victor (responsável pelos Sistemas de Informação Geográficas), Jason Denlinger (antigo Gestor de Pesquisa), Muaule Tina Tadeu (estudante graduada do curso de mestrado em Biologia de conservação no PNG).

Aos colegas e amigos do ISPG, em especial a turma do curso de Engenharia Florestal 2017, que de forma directa ou indirecta possibilitaram a realização desse trabalho.

= Meu Muito Obrigado =

RESUMO

A acção do fogo sobre as florestas, atinge não só a cobertura vegetal, mas também as características do solo, a fauna silvestre e a atmosfera, podendo ser altamente destrutiva quando se trata de incêndios florestais. A perda da biodiversidade e degradação de ecossistemas no Parque nacional da Gorongosa (PNG) constituem potenciais ameaças consequentes da ocorrência de incêndios florestais causados pelas comunidades locais durante o uso descontrolado do fogo nas actividades agrárias, caça de subsistência, colecta de mel, renovação de pastagens e expansão de áreas habitacionais. Com vista a fornecer informações detalhadas que permitam desenvolver e aplicar melhores técnicas de monitoria e planeamento de acções de prevenção, controlo e combate à incêndios florestais na área de estudo, foram mapeadas as diferentes classes de uso e ocupação da terra, foi analisada a inclinação e orientação do relevo, a proximidade às estradas e às zonas habitacionais, assim como a densidade de focos de fogo registados na área de estudo entre os anos 2014 a 2022, indicando dessa forma as áreas de potencial risco de ocorrência e propagação de incêndios florestais. Para a geração das variáveis de estudo usou-se imagens matriciais dos satélites Sentinel-2, nave espacial Endeavour, NOAA-20, AQUA, TERRA e Suomi NPP. Para completar, foram usados dados vectoriais de estradas e zonas habitacionais. As análises das variáveis de estudo foram feitas seguindo etapas do raciocínio *fuzzy* descrito por Juvanhol (2014), que compreendem a Fuzzyficação, Inferências e Defuzzyficação. Na primeira e segunda etapa, cada variável de influência foi atribuída uma função de pertinência *Fuzzy* associada a uma base de regras, permitindo-lhe estabelecer graus de pertinência a uma escala de 0 a 1 e indicar dessa forma a sua influência ao risco no *software* de SIG (ArcGIS10.5). Na terceira etapa, foi obtido um mapa cartográfico do risco de ocorrência de incêndios florestais mediante a análise de sobreposição *fuzzy* pelo operador *fuzzy Gamma*. As regiões de potencial risco de ocorrência de incêndios florestais, são constituídas maioritariamente pelas zonas próximas às habitações e estradas, pastagens/inundações, agricultura e floresta esparsa/savanas. As zonas de alto risco apresentam uma área de 673.67 km², o equivalente a 18.5 % do total de área de estudo. A orientação do relevo apresenta 2302.4 Km² de alto risco, influenciando em cerca de 42.4 % de peso para a ocorrência de incêndios e as regiões que se encontram a um intervalo de 0 a 2159.5 metros de distância em relação às estradas, são fortemente influenciadas, contribuindo com 15 % de peso para o alto risco. A frequência dos focos de incêndios, atinge o seu pico no mês de Setembro, período este em que se registam muitas actividades de preparação da terra para o início da nova campanha agrícola. Por tanto, recomenda-se que haja maior controlo sobre a actividade do fogo nos meses de Julho a Novembro.

Palavras-chave: Modelagem *Fuzzy*; Mapeamento do Risco; Incêndios Florestais; Áreas de conservação.

ABSTRACT

The action of fire on forests affects not only the vegetation cover, but also the characteristics of the soil, the wild fauna and the atmosphere, and can be highly destructive when it comes to forest fires. The loss of biodiversity and degradation of ecosystems in the Gorongosa National Park (GNP) are potential threats resulting from the occurrence of forest fires caused by local communities during the uncontrolled use of fire in agricultural activities, subsistence hunting, honey collection, pasture renewal and expansion of housing areas. With a view to providing detailed information that allows the development and application of better techniques for monitoring and planning actions to prevent, control and fight forest fires in the study area, the different classes of land use and occupation were mapped, the slope and relief orientation, proximity to roads and residential areas, as well as the density of fire outbreaks registered in the study area between the years 2014 to 2022, thus indicating the areas of potential risk of occurrence and propagation of forest fires. To generate the study variables, matrix images from the Sentinel-2 satellites, the Endeavor spacecraft, NOAA-20, AQUA, TERRA and Suomi NPP were used. To complete, vector data of roads and residential areas were used. The analyzes of the study variables were carried out following the steps of fuzzy reasoning described by Juvañhol (2014), which comprise Fuzzyfication, Inferences and Defuzzyfication. In the first and second stages, each influence variable was assigned a fuzzy pertinence function associated with a rule base, allowing you to establish degrees of pertinence on a scale from 0 to 1 and thus indicate its influence on the risk in the software of GIS (ArcGIS10.5). In the third stage, a cartographic map of the risk of occurrence of forest fires was obtained through fuzzy overlay analysis by the fuzzy operator Gamma. The regions of potential risk of forest fires are mainly constituted by areas close to houses and roads, pastures/floods, agriculture and sparse forest/savannahs. The high-risk zones have an area of 673.67 km², equivalent to 18.5% of the total study area. The orientation of the relief presents 2302.4 Km² of high risk, influencing about 42.4% of weight for the occurrence of fires and the regions that are at a range of 0 to 2159.5 meters away from the roads, are strongly influenced, contributing with 15% weight for high risk. The frequency of fire outbreaks reaches its peak in September, a period in which many land preparation activities for the start of the new agricultural campaign take place. Therefore, it is recommended that there be greater control over fire activity in the months of July to November.

Keywords: Fuzzy modeling; Risk mapping; Forest Fires; Conservation areas.

1. INTRODUÇÃO

O Parque Nacional da Gorongosa foi proclamado em 1960 como área de protecção total, destinada a conservação da biodiversidade e garantir a continuação dos processos ecológicos e preservação dos valores naturais da região (BR, 2016).

Após a independência em 1975, o parque sofreu grandes perturbações por conta da guerra civil e posteriormente esteve acompanhada de eventos massivos de caça ilegal cuja finalidade era de suprir as necessidades de alimentação, assim como para fins lucrativos que envolviam a venda de marfim e peles dos animais. Esses eventos, reduziram drasticamente a quantidade de espécies faunísticas que faziam parte do ecossistema do parque, o que obrigou as autoridades a dar início aos esforços de restauração nos anos 2000 (BR, 2016; Tarne & Mortenson, 2009).

Nos dias actuais, com a situação política e militar estabilizada, a população local voltou às suas práticas tradicional de actividades envolvendo o fogo (agricultura e pastagens), causando incêndios cada vez mais problemáticos aos ecossistemas dessa unidade de conservação (Tarne & Mortenson, 2009). De acordo com Oliveira (2002) e Meneguelli (2018), a conjuntura dos grandes incêndios florestais em Unidades de Conservação é considerada como uma grave ameaça à manutenção dos processos biológicos e à biodiversidade, pois a acção do fogo sobre as florestas, não só atinge a cobertura vegetal, mas também as características do solo, a fauna silvestre e a atmosfera, causando grandes danos ecológicos.

De acordo com MICOA, (2007) e Jequecene et al., (2017), a dependência das populações pelos recursos naturais, em particular os recursos florestais para obtenção de combustível e rendimento (Agricultura e Caça), acrescido ao crescimento da população e a pobreza, constituem um dos principais motivos que levam as comunidades locais a recorrerem a prática de queimada como forma de explorar as florestas e alcançarem os seus objetivos, bem como satisfazerem as suas necessidades.

Diante da crescente frequência dos casos de incêndios florestais nas unidades de conservação, assim como da constatação do seu poder de destruição e da complexidade de previsão dos incidentes, a busca por ferramentas que auxiliem na sua prevenção e combate tornou-se indispensável, o que contribuiu para o surgimento de novas metodologias como o zoneamento de risco de incêndios florestais associado a lógica *Fuzzy* (Biazatti, et al., 2020).

1.2. Delimitação do Problema e Justificação

O Parque Nacional da Gorongosa, para além de ser uma das maiores histórias de sucesso de restauração da fauna bravia de África é considerado como o “Serengeti da África Austral” devido à diversidade e quantidade de animais que lá existem, associados ao valor histórico da região, valor social e político (GM, 2018), tornando-se uma das áreas de conservação mais importantes do país (PNG, 2014). Sendo uma das áreas de conservação com elevada importância ao nível nacional e internacional, os problemas da perda da biodiversidade (flora e fauna) e a degradação de ecossistemas, constituem grande preocupação e têm sido alvo de discussões e pesquisas no Parque Nacional da Gorongosa (PNG, 2014).

De acordo com WWF (2017) e Jequecene et al., (2017), uma das grandes ameaças à biodiversidade do Parque Nacional da Gorongosa é a vulnerabilidade de ocorrência de incêndios florestais causados pela prática de queimadas durante o preparo dos campos agrícolas, caça de subsistência e produção de mel por parte da comunidade (associados a questão dos conflitos sobre o direito de uso e aproveitamento da terra), contribuindo no aumento da perda da biodiversidade e destruição de ecossistemas. De acordo com os dados apresentados por Stalmans et al., (2018), apesar da população de herbívoros do PNG ter aumentado em 26.5% num período de 2014 a 2018, as espécies de “*Bushbuck*, *Common reedbuck*, *Duiker grey*, *Duiker red* e *Oribi*”, apresentaram uma redução percentual de 26.9, 13.9, 31.1, 19.2, 5.7 e 11.8 respectivamente.

Face aos problemas anteriormente mencionados, o estudo dos incêndios florestais revela-se como sendo de grande importância, pois segundo Arone (2002), para além de demonstrar os perigos que podem resultar do uso descontrolado do fogo, permite que se desenvolvam instrumentos necessários e adequados para sua prevenção e gestão.

A aplicação da modelagem *fuzzy*, para estudos dos incêndios florestais nas áreas de conservação permite que as análises, assim como a tomada de decisões sejam feitas com maior precisão, por meio de uso de probabilidades, detectando dessa forma as incertezas e transições comuns durante o processo de mapeamento, reduzindo ao máximo o grau de subjectividade gerado pelo pesquisador (Juvanhol, 2014).

Nesse contexto, a aplicação da modelagem *fuzzy* na realização dessa pesquisa de incêndios florestais, fez-se necessário, pois permitiu uma melhor avaliação dos factores de influência, representando diferentes cenários de risco que poderão auxiliar na tomada de decisões, durante o processo de monitoramento e planeamento de acções de controlo e combate de incêndios; preservando dessa

forma a biodiversidade (faunística e florística), bem como garantir o sucesso contínuo da restauração, reduzir as taxas de degradação de ecossistema e melhoramento do microclima local.

1.3. Objectivos

1.3.1. Objectivo Geral

- Avaliar a variabilidade espacial do risco de ocorrência de incêndios florestais por meio da aplicação da modelagem *fuzzy* no Parque Nacional da Gorongosa.

1.3.2. Objectivos Específicos

- Analisar as diferentes classes de uso e ocupação da terra do Parque Nacional da Gorongosa, indicando a sua influência ao RIF;
- Analisar a influência que a inclinação e a orientação do relevo, exercem para o elevado risco de ocorrência de incêndios florestais;
- Analisar a influência que a proximidade às estradas e às zonas habitacionais exercem para a potencialização do risco de ocorrência incêndios florestais;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fogo e Incêndios Florestais

Existe uma distinção conceitual entre o Fogo, Incêndio Florestal e Risco de incêndio Florestal; O fogo pode ser interpretado como o fenômeno físico resultante da rápida combinação entre o oxigênio e uma substância combustível, com produção de calor, luz e geralmente chamas (Soares, 1985); é uma reação química de rápida oxidação (Gaylor, 1974), caracterizada por reações exotérmicas em cadeia que compreendem o processo conhecido por combustão (Batista, 1990).

Segundo Cianciulli (1981), Soares (1985) e Batista (1990), citados por Beutling (2009), para que ocorra o processo de combustão, é necessário que haja uma interação de três elementos: calor, oxigênio (comburente) e material combustível (Figura 1). A eliminação ou ausência de qualquer um dos elementos do triângulo impede a ocorrência da combustão, tornando impossível a ignição ou a propagação do fogo.



Figura 1: Triângulo do Fogo

Fonte: ENB (2003), citado por Motta (2008).

De acordo com Morgera e Cirelli (2009), citados por Mathe (2013), Incêndio florestal é qualquer fogo não planejado e descontrolado, que ocorre em espaços florestais independentemente da fonte de ignição. Na mesma linha, ICMBIO (2010) refere que Incêndio florestal é todo fogo sem controle que incide sobre qualquer forma de vegetação, podendo ter sido provocado pelo homem (intencional ou negligência) como por causa natural. Por outro lado Sousa et al., (2000) referem que o Risco de incêndio é a condição potencial de ocorrência e propagação de um incêndio florestal, definido pelas características do material combustível, entre outros fatores que somados, formam uma situação favorável de ignição e dificuldade de extinção do fogo.

2.2. Agentes de Influência à Ocorrência de Incêndios

2.2.1. Presença Humana

Para Oliveira (2002), as actividades humanas são atualmente responsáveis pela maioria dos focos de ignição que causam incêndios florestais a nível mundial. Na mesma linha, Novillo (2008), citado por Mathe (2013), refere que os padrões espaciais dos focos de ignição estão fortemente associados ao acesso humano às paisagens naturais, proximidade às áreas urbanas e às estradas.

Particularmente em Moçambique, as queimadas são usadas para fins de: limpeza de campos agrícolas, abertura de caminhos que facilitam a circulação da população, caça, colecta de mel, produção de carvão, renovação das áreas de pastagem, entre outros (MICOA, 2007 & Jequecene, et al., 2017).

2.2.2. Material Combustível

Entende-se como combustível florestal, qualquer material orgânico, vivo ou morto, no solo ou acima deste, suscetível de participação no processo de combustão (Batista, 1990; Soares, 1985), e segundo Motta (2008) citado por Mathe (2013) os combustíveis podem ser madeira, papel, alguns metais, etc.

De acordo com Vélez (2000) citado por Beutling (2009), o início e a propagação do fogo dependem mais dos combustíveis florestais do que de qualquer outro factor, sendo que para estimar corretamente o comportamento de um incêndio, deve-se observar com antecedência, as particularidades dos diversos combustíveis presentes em uma determinada região.

Os combustíveis podem dividir-se em dois grandes grupos (vivos e mortos); os combustíveis vivos apresentam uma quantidade de água elevada em relação aos combustíveis mortos em que o teor de água é muito baixo, podendo variar com a humidade do ar (Castro et al., 2003).

Para Soares (1985) e Oliveira (2002), os combustíveis são basicamente classificados em:

- **Perigosos:** todos os materiais secos e de diâmetro igual ou inferior a 1,0 centímetro, constituindo-se de pequenos galhos, folhas, líquenes, musgos e gramíneas. Esses materiais perdem humidade de forma bastante rápida, apresentam menor temperatura de ignição, facilitam o início do fogo e aceleram a propagação, queimando-se rapidamente com produção de calor e chamas intensas, sendo também, a principal matéria consumida pelo fogo;

- **Semi-perigosos:** todos os materiais secos com diâmetro acima de 1,0 centímetro, constituindo-se de galhos, troncos caídos e tocos de árvores. São materiais lenhosos ou em decomposição e compactados, que por suas características queimam lentamente, e embora sejam de ignição mais lenta e difícil em relação aos combustíveis perigosos, desenvolvem intenso calor e podem manter-se em combustão latente, com risco de reiniciar incêndios aparentemente controlados;
- **Verdes:** todos materiais que constituem a vegetação viva existente na floresta, estes combustíveis podem ser considerados como não-inflamáveis devido ao alto teor de umidade. No entanto, é importante mencionar o facto de que o calor libertado pela combustão de outros combustíveis pode secar estes materiais, tornando-os igualmente inflamáveis.

Para Martins (1998) citado por Mathe (2013), os combustíveis dividem-se em função das suas características nomeadamente: tamanho, quantidade e intensidade.

- **Tamanho:** Os combustíveis leves constituídos de pastagens de gramíneas, herbáceas, cerrados limpos, pastagens nativas, produzem incêndios de maior velocidade de propagação do que os combustíveis pesados como troncos, tocos e raízes;
- **Quantidade:** A descontinuidade horizontal da vegetação retarda a propagação do fogo. Já a sua continuidade vertical aumenta a probabilidade de ocorrência de incêndios de copa.
- **Intensidade:** A velocidade de propagação varia em proporção directa com o peso do combustível disponível. Quando seu peso duplica, a intensidade quadruplica.

2.2.3. Uso e Cobertura da Terra

Segundo Rosa (2007) citada por Juvanhol (2014), o estudo do uso e cobertura da terra consiste em buscar conhecimento de todas as formas de utilização do solo pelo homem, bem como a caracterização das diferentes categorias da vegetação natural que revestem o solo e suas respectivas localizações. As diferentes formas de uso e ocupação da terra, exercem influência de maneira positiva ou negativa para o início e propagação de um incêndio, afetando o seu comportamento de acordo com a distribuição e variação das classes em uma determinada região. O uso e cobertura da terra, também determina os padrões de acessibilidade e distribuição do homem que por sua vez potencia a presença do risco de início e propagação do fogo.

De acordo com o esquema de classificação do Centro Nacional de Cartografia e Teledeteção (CENACARTA, 2020), as diferentes classes de uso e ocupação da terra podem ser: Solo exposto,

Agricultura, Zonas húmidas (corpos de água), Zonas de pastagens, Zonas de urbanização, Pradarias, Matagal, Floresta aberta e Floresta fechada.

2.2.4. Topografia

A topografia do terreno determina o tipo de combustível existente e influencia decisivamente no comportamento do fogo, também é responsável pela localização, crescimento e inflamabilidade dos combustíveis devido aos seus efeitos sobre o clima; (Brow; Davis, 1973); (Gaylor, 1974) citados por Juvanhol (2014). Estes autores, referem que o efeito da topografia sobre o comportamento do fogo se assemelha ao efeito do vento, quando todos os outros fatores são mantidos constantes. Realçam ainda que o padrão de início, bem como a direção principal de propagação de incêndios são determinados principalmente pela velocidade do vento e pela topografia.

As características topográficas influenciam no desenvolvimento de incêndios florestais principalmente sob três aspectos: altitude, inclinação e a orientação do relevo; a altitude está relacionada intimamente com as modificações climáticas, e a inclinação influencia nas condições de pré-aquecimento dos combustíveis e modifica a taxa de propagação do fogo (Juvanhol, 2014).

De acordo com FMIA (2000) citado por Juvanhol (2014), a declividade favorece a continuidade dos combustíveis que potenciam o pré-aquecimento dos combustíveis adjacentes.

O relevo por sua vez, condiciona a formação do microclima e tem grande influência no regime dos ventos (deslocamento de massas de ar), afetando dessa forma a humidade dos combustíveis e consequentemente o comportamento do fogo, (Botelho; Salgueiro, 1990) citados por Juvanhol (2014).

2.2.5. Clima

As florestas e os incêndios florestais são fortemente afetados pela variação climática, onde os elementos meteorológicos, tais como a temperatura, humidade relativa, vento e precipitação, exercem efeitos característicos sobre o comportamento do fogo, influenciando decisivamente a ignição e a propagação de incêndios, (Batista, 2000); (Martins, 1998); (Motta, 2008) citados por Mathe (2013).

A ocorrência de grandes incêndios está sempre correlacionada a prolongados períodos de seca (Soares, 2003), aumentando dessa forma a sua potencialidade de propagação, principalmente devido a secagem progressiva do material combustível morto, que por sua vez, afeta o teor de

humidade da vegetação (Leonardo, et al., 2011). De acordo com mesmo autor, a precipitação torna-se um fator importante na redução do potencial de ocorrência e propagação dos incêndios, podendo chegar até o potencial zero, dependendo da quantidade de água precipitada.

De acordo com Batista (2000) citado por Mathe (2013), o vento também afeta o comportamento do fogo de várias maneiras: o vento leva para longe o ar carregado de humidade, acelerando a secagem dos combustíveis; os ventos leves auxiliam certos materiais em brasa a dar início ao fogo; e uma vez iniciado o fogo, o vento auxilia a combustão pelo aumento do suprimento de oxigénio. O vento também, alastra o fogo através do transporte de materiais acesos ou aquecidos para novos locais e inclina as chamas para perto dos combustíveis não queimados que estão na frente do fogo, direcionando dessa forma a propagação do fogo.

A radiação solar tende a aumentar a temperatura ambiente reduzindo dessa forma a humidade relativa do ar. Desse modo, os cenários climáticos do período de maior ganho energético (12 às 16 h) implicam uma maior insolação, maior temperatura e menor humidade relativa do ar, favorecendo às ocorrências de incêndios (Tamiozzo & Torres, 2006) citado por Mathe (2013).

2.3. Modelos e Modelagem

Modelagem é entendida como sendo o processo de construção (criação) de um modelo, de forma a compreender um determinado fenómeno da realidade, e segundo Gilbert (1995) citado por Ferreira e Justi (2007), modelos são representações de um objeto, fenómenos, processos ou ideias, que se produzem com um propósito específico, possibilitando a elaboração de explicações, previsões do comportamento e propriedades do sistema modelado. Um modelo não é uma cópia da realidade, mas sim é uma forma de representá-la a partir da sua interpretação, com tudo, os modelos estão no centro de qualquer teoria e são as principais ferramentas usadas pelos cientistas para produzir conhecimento e solucionar diversos tipos de problemas.

Segundo Lambin (1994) citado por Pedrosa e Câmara (2003), os modelos podem ser empíricos e de sistema. Os empíricos focalizam os relacionamentos entre as variáveis do modelo, a partir da suposição de que os relacionamentos observados no passado continuarão no futuro, e os de sistemas são descrições matemáticas de processos complexos que interagem entre si, enfatizando as interações entre todos os componentes do sistema. Uma característica chave de modelos de sistema é a eficiência com que abordam a dimensão espacial, e a implementação de conceitos como relações de vizinhança e suporte do uso combinado de múltiplas escalas.

- **Cadeias de Markov** são modelos matemáticos para descrever processos estocásticos (probabilísticos) por meio das variáveis aleatórias (Modelo 1).

$$\mathbf{P}(t+1) = \mathbf{P}_n \cdot \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

Onde: $\mathbf{P}(t)$ é o estado do sistema no tempo t , $\mathbf{P}(t+1)$ é o estado do sistema após o instante $t+1$ e \mathbf{P}_n são os estados possíveis de acontecer, que são representados em matrizes de possibilidades de transição.

- **Modelos logísticos de difusão** são utilizados para descrever matematicamente fenômenos em que as variáveis inicialmente variam a um ritmo lento, depois a um ritmo intensificado, e finalmente o ritmo reduz até que se atinja o nível de saturação. Neste modelo, verificam-se as interações temporais entre as variáveis do sistema (Modelo 2).

$$\frac{dP}{dt} = rP \left[\frac{U-P}{U} \right] \quad (2)$$

Onde: P é a variável de um fenômeno de crescimento ao longo do tempo t ; r é a taxa de crescimento e U uma função de crescimento.

- **Modelos de regressão** são as que estabelecem relações estatísticas entre um fenômeno em estudo e as variáveis independentes envolvidas (forças direcionadoras), e que exercem influência sobre ele. Em modelos de regressão a dimensão temporal é considerada, mas a distribuição espacial do fenômeno não é abordada. Matematicamente, o modelo estabelece um relacionamento linear entre as variáveis dependentes e independentes (Modelo 3).

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_ix_i + E \quad (3)$$

Onde: Y é a mudança ocorrida em um determinado tempo; X_i são as variáveis independentes (forças direcionadas); a_i são coeficientes de regressão dos relacionamentos; E é a componente erro.

- **Modelos de Ecossistemas** são projetados para imitar o comportamento de um sistema, e baseiam-se na composição de ecossistemas complexos em um número de equações diferenciais. Estes modelos são adequados para representar processos não estacionários, predizendo os impactos ecológicos e econômicos das mudanças ao longo do tempo (Lambin, 1994) citado por Pedrosa e Câmara, (2003).

- **Modelos de Simulação Dinâmica Espacial** são baseados em modelos de ecossistemas com extensões para acomodar a heterogeneidade espacial e processos humanos de decisão. Estes modelos, representam o espaço como uma matriz de células, podendo se aplicar equações matemáticas a cada uma das células de maneira simultânea. Cada célula do modelo está conectada à suas células vizinhas, estabelecendo um fluxo entre as células adjacentes. Essa conexão entre as células, facilita o mecanismo de predições no sistema, como por exemplo, se uma célula tem três vizinhos com estado X, é altamente provável que o estado desta célula também venha a ser X (regras de transição). Nestes modelos, as regras de tomada de decisão são representadas através de abstrações muito semelhantes às que ocorrem na mente humana (Pedrosa & Câmara, 2003).

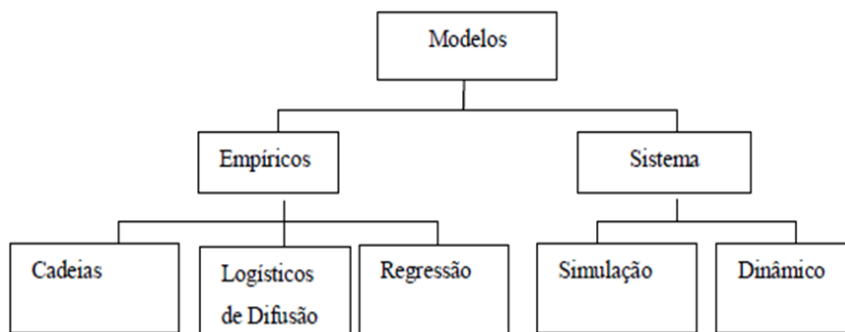


Figura 2: Classificação dos Modelos

Fonte: Pedrosa e Câmara (2003).

2.3.1. Modelagem *Fuzzy*

Segundo Juvanol (2014), a modelagem por meio da lógica *fuzzy* tem-se estabelecido nos últimos anos em diversas áreas de conhecimento e em estudos ambientais para a tomada de decisões. Para Wagner (2003) citado por Rignel et al., (2011), a lógica difusa /*fuzzy* é uma ferramenta capaz de capturar informações incertas (vagas/imprecisas) descritas em linguagem natural (humana) e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação. Antes do surgimento da lógica difusa/*fuzzy*, essas informações imprecisas (sem limites bem definidos) não tinham como ser processadas, pois na lógica clássica (desenvolvida por Aristóteles), uma premissa não pode ser verdadeira e falsa ao mesmo tempo, diferentemente da lógica *fuzzy* (proposta por Zadeh em 1965) que permite ao mesmo elemento (x) pertencer a vários conjuntos (veracidade e falsidade) ao mesmo tempo. Porém, este mesmo elemento (x) apresenta diferentes graus de pertinência em cada um dos conjuntos; ou seja, Lofti A. Zadeh, propôs uma caracterização mais ampla que possibilitou a atribuição de um grau de pertinência $\mu_A(x)$ para cada elemento $X \in U$. Este grau de pertinência

pertence a uma faixa de $[0-1]$, sendo zero (0) indicador da impertinência total do elemento X ao conjunto *fuzzy*, um (1) indicador da pertinência total do elemento X ao conjunto *fuzzy*, e os valores entre 0 e 1, indicam o quão elemento X é pertencente ao conjunto *fuzzy* (Juvanhol, 2014). Dessa forma, cada conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência, que por sua vez é escolhida de acordo com a variável de estudo a ser modelada e em função do problema. Essas funções podem ser de forma: Triangular, trapezoidal, sigmoidal crescente (*Fuzzy Large*), sigmoidal decrescente (*Fuzzy Small*), gaussiana, linear e em forma de sino (Figura 3).

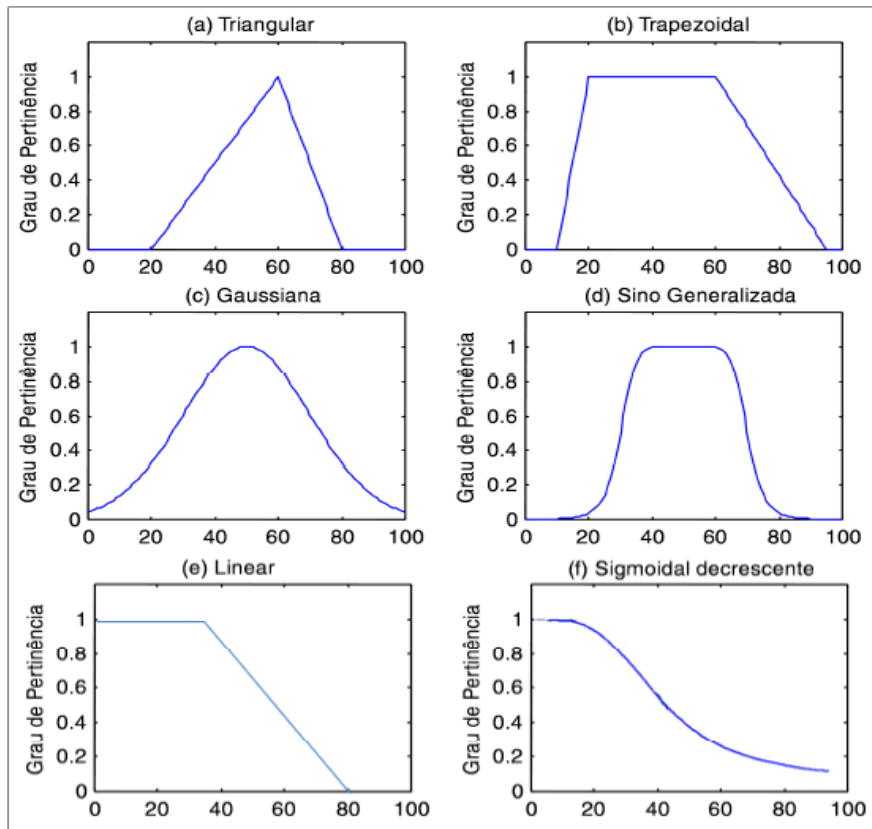


Figura 3: Funções de pertinência dos conjuntos *Fuzzy*

Fonte: Juvanhol (2014)

2.3.2. Modelos de Sistema *Fuzzy*

Existem diversos modelos de sistema *fuzzy*, como por exemplo: modelo de Mamdani, modelo de Takagi-Sugeno-Kang (TSK), modelo de análise de sobreposição *Fuzzy* de Ronie-Silva-Juvanhol (RSJ), entre outros. A distinção entre os modelos se dão através das regras *fuzzy* (Silva, 2013). No modelo de Mamdani, para se obter a saída utilizam-se métodos de defuzzyficação, como: Centro de Massa (CoM), Média do Máximo (MoM) e Centro da Área (CoA). Os modelos TSK e RSJ são representados pelas funções das variáveis de entrada, e para TSK a saída é obtida através da Média

Ponderada (MP) das saídas. O modelo RSJ, difere-se do modelo TSK através do método de obtenção da variável dependente (saída). No modelo RSJ, a saída é obtida mediante o operador *FUZZY Gamma* que é o produto algébrico da soma das funções *fuzzy* (*FUZZY Sum*) e o produto das funções *fuzzy* (*FUZZY Product*), ambos elevados a potência gama (Modelo 4).

A aplicação da modelagem *fuzzy* dá-se mediante a execução de três etapas de raciocínio *Fuzzy*: sendo elas a *fuzzyficação*, a *inferência* e a *defuzzyficação*.

- **Fuzzyficação**, corresponde a primeira etapa do tratamento do raciocínio *fuzzy*, e é através dela que se transformam as variáveis do problema em valores *fuzzy*, ou seja, as variáveis de entrada se encontram na forma determinística (número) e através da *fuzzyficação*, são transformadas em forma *fuzzy* (pertinência). Cada conjunto *fuzzy* (variável *fuzzyficação*) é caracterizado pela sua função de pertinência. É através dela, que é definido o quanto um determinado elemento pertence ou não ao conjunto.
- **Inferências**, corresponde a segunda etapa que consiste na elaboração de uma base de regras envolvendo a escolha das variáveis linguísticas, seleção do formato das regras condicionais, seleção dos termos associados a cada variável linguística e síntese do conjunto de regras.
- **Defuzzyficação**, corresponde a terceira e última etapa, que consiste na transformação das variáveis que se encontram na forma *fuzzyficação* para uma forma determinística, determinando o valor real das saídas dentro da faixa estipulada pela lógica *fuzzy*.

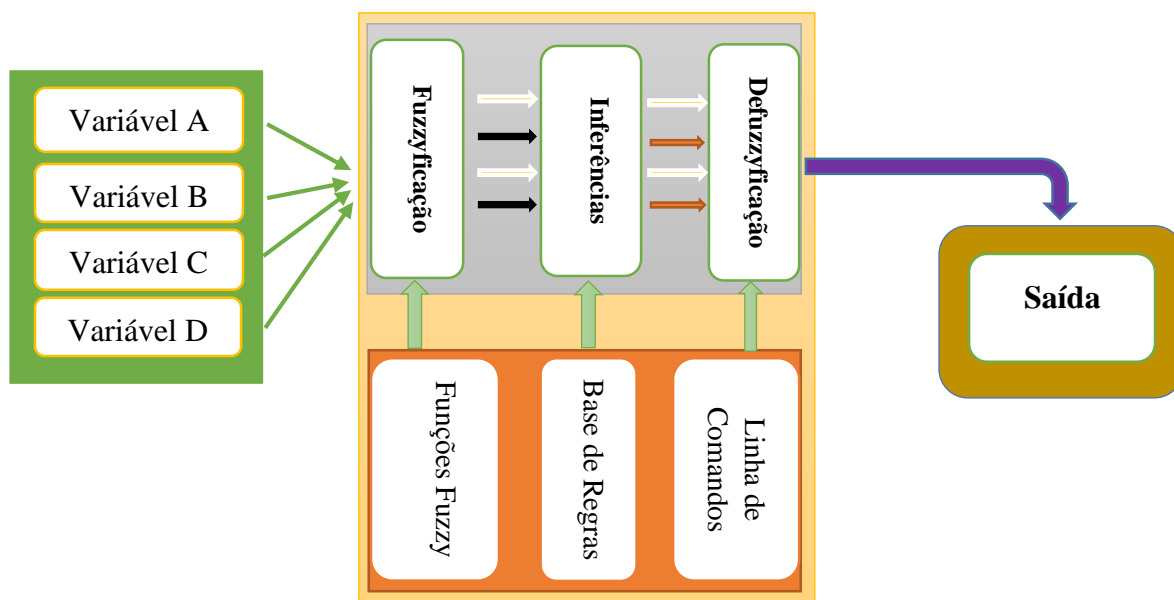


Figura 4: Esquema do Raciocínio na Modelagem *Fuzzy*

3. METODOLOGIA

3.1. Descrição do Parque Nacional da Gorongosa

3.1.1. Localização e Superfície

O Parque Nacional da Gorongosa (PNG) localiza-se na zona centro de Moçambique, estendendo-se entre as latitudes 18° 27' 12" S e 19° 12' 0" S e longitudes 34° 10' 24" E e 34° 50' 48" E, no centro da província de Sofala.

O PNG estende-se pelos distritos de Gorongosa, Cheringoma, Muanza, e é limitado pelos distritos de Nhamatanda e Dondo no sudeste do grande complexo do Vale do Rift (Stalmans & Beilfuss, 2008) e (PNG, 2014) citados por Francisco (2016). Atualmente com a inclusão da Serra da Gorongosa, o PNG tem uma extensão de 4067 Km², o equivalente a 406700 ha (GM, 2018).

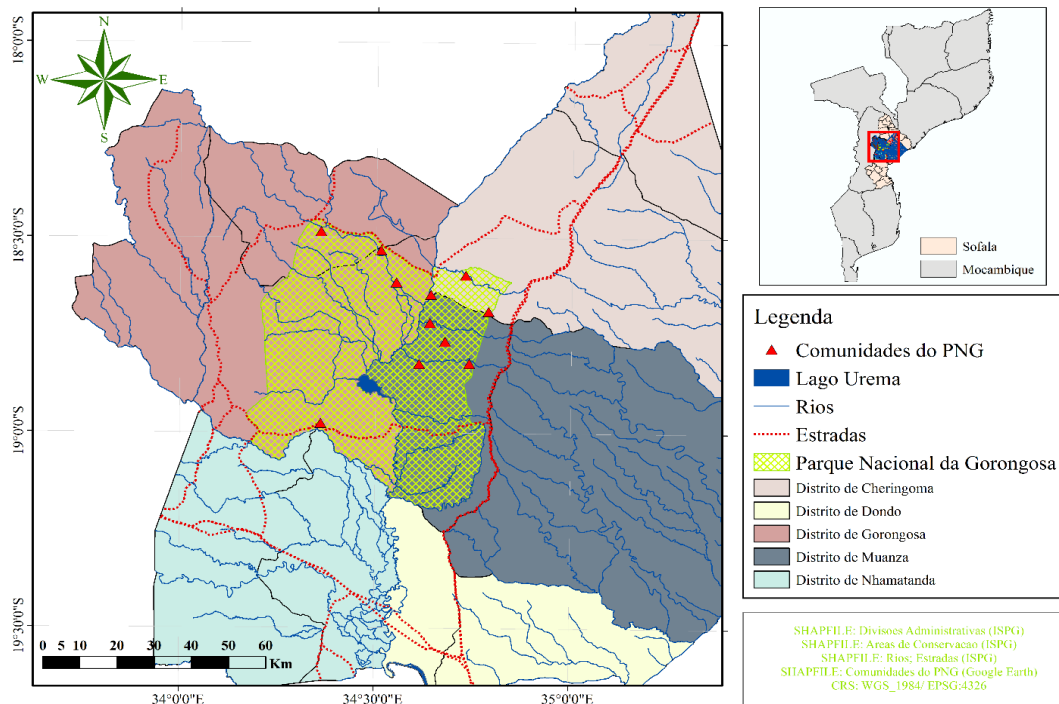


Figura 5: Mapa de Localização do Parque Nacional da Gorongosa

Fonte de dados: ISPG e Google Earth

3.1.2. Fisiografia e Hidrologia do PNG

Segundo BR (Série I de 25 de Julho de 2016), o Parque Nacional da Gorongosa é constituído caracteristicamente por quatro grandes regiões, sendo elas:

- A região do Vale do Rift, que é a característica saliente da zona com 40 Km de largura e está situado a uma altitude de 15 a 80 metros em relação ao nível do mar;

- A região do planalto de Cheringoma, erguido à 300 m na extremidade Leste do Vale do Rift;
- A região central (*Midlands*) que se ergue até 400 m de altitude;
- A Serra da Gorongosa, com dimensão de 20 por 30 Km e elevando-se nos “Midlands” a uma altitude de até 1863 m acima do nível do mar.

Hidrologicamente o PNG é drenado por vários Rios provenientes da Serra da Gorongosa, da Região Central (*Midlands*) e do Planalto de Cheringoma até ao Vale do Rift. “O lago Urema encontra-se no epicentro da drenagem com um extravasamento da drenagem através do rio Urema para o Pungué no seu caminho para o oceano. A fronteira Leste do PNG, encontra-se a Bacia hidrográfica no topo do planalto de Cheringoma. A parte oriental extrema da zona tampão é drenada para o Leste diretamente para o oceano, enquanto as encostas ocidentais do Planalto de Cheringoma são drenados para o rio Urema e depois para o rio Pungué. Grande extensão do Vale do Rift é inundada regularmente, trazendo grandes implicações na gestão e desenvolvimento do PNG” (BR, 2016).

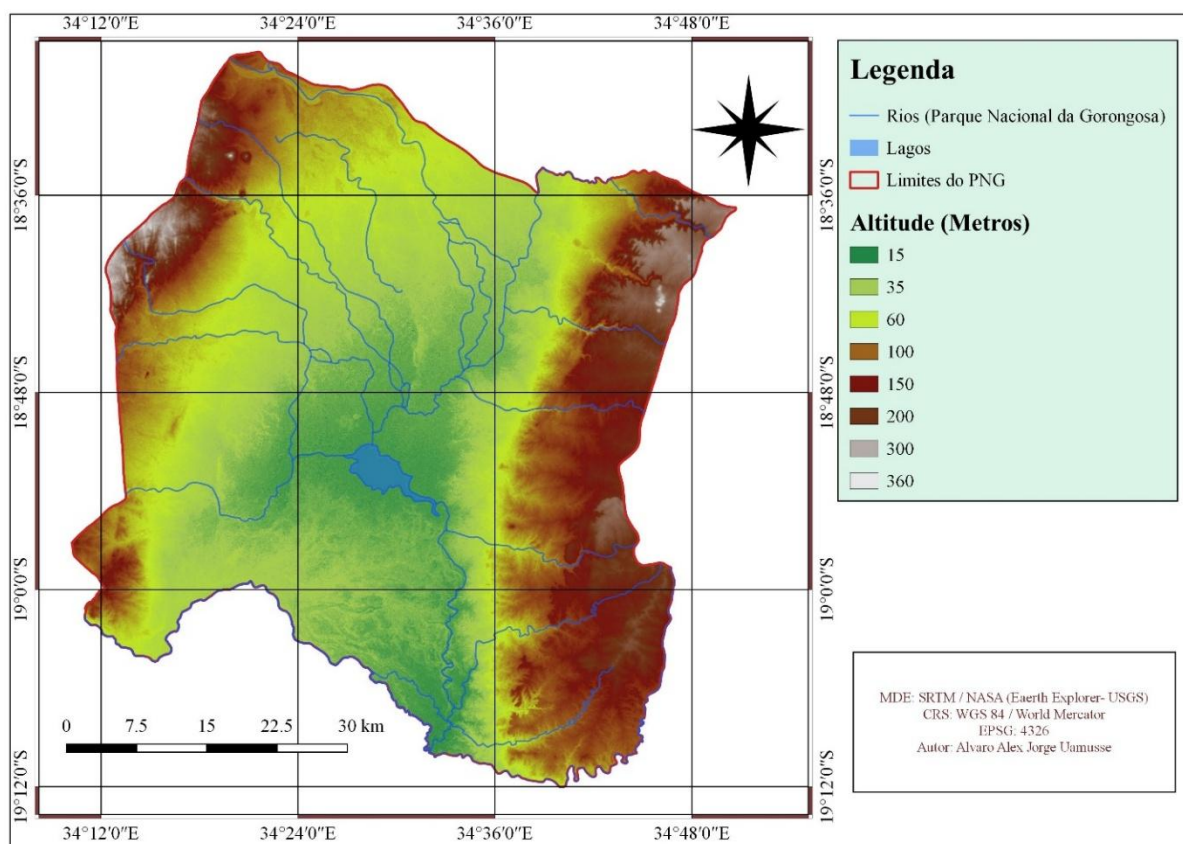


Figura 6: Mapa topográfico do Parque Nacional da Gorongosa

Fonte de dados: SRTM (Earth Explorer-USGS)

3.1.3. Geologia e Solos do PNG

O Vale do Rift é normalmente caracterizado por depósitos aluviais com material coluvial na base do Planalto de Cheringoma. Nessa região há ocorrência de solos cinzentos (alguns hidromórficos) derivados de areias aluviais (Dgedge, et al., 2016).

O Planalto de Cheringoma, por sua vez é constituído por ardósia cinzenta e calcário; com uma formação de solos arenosos e permeáveis. Esta região é caracterizada pela existência de um horizonte impermeável na base da areia em várias profundidades das linhas de drenagem e planícies aluviais.

A região central (*Midlands*) é na sua maioria constituída por gnaisses, pegmatitos e diques de dolerito, formando solos castanhos, arenosos fersialíticos, e vermelhos respetivamente. Na Serra da Gorongosa, encontram-se solos ferralíticos de baixa fertilidade e solos ricos nas escarpas. Os solos ferralíticos de baixa densidade são influenciados pela elevada precipitação e os solos ricos (nas escarpas) são derivados pelo processo de intemperismo das rochas de cabro e dolerito ígneas (BR, 2016).

3.1.4. Clima do PNG

No Planalto de Cheringoma regista-se uma precipitação média anual superior a 1000 mm. O Vale do Rift a Oeste, recebe cerca de 700 a 900 mm por ano; esses valores aumentam com a elevação em direção à Serra da Gorongosa a Oeste. Por sua vez, na Serra de Gorongosa registam-se valores elevados de precipitação que ultrapassam 2000 mm por ano (BR, 2016).

Segundo os dados da Meteoblue (2022), ao longo do ano de 2021, o PNG registou temperaturas máximas que vaiaram de 28 a 44°C, temperaturas médias de 20 a 31°C e as temperaturas mínimas de 12 a 25°C. No mesmo ano, o PNG registou precipitações variando de 0 a 160 mm e humidade relativa do ar variando de 40 a 90%. A velocidade dos ventos foi de 13 a 35 Km/h (máxima), 5 a 14 Km/h (média) e 0 a 5 Km/h (baixa).

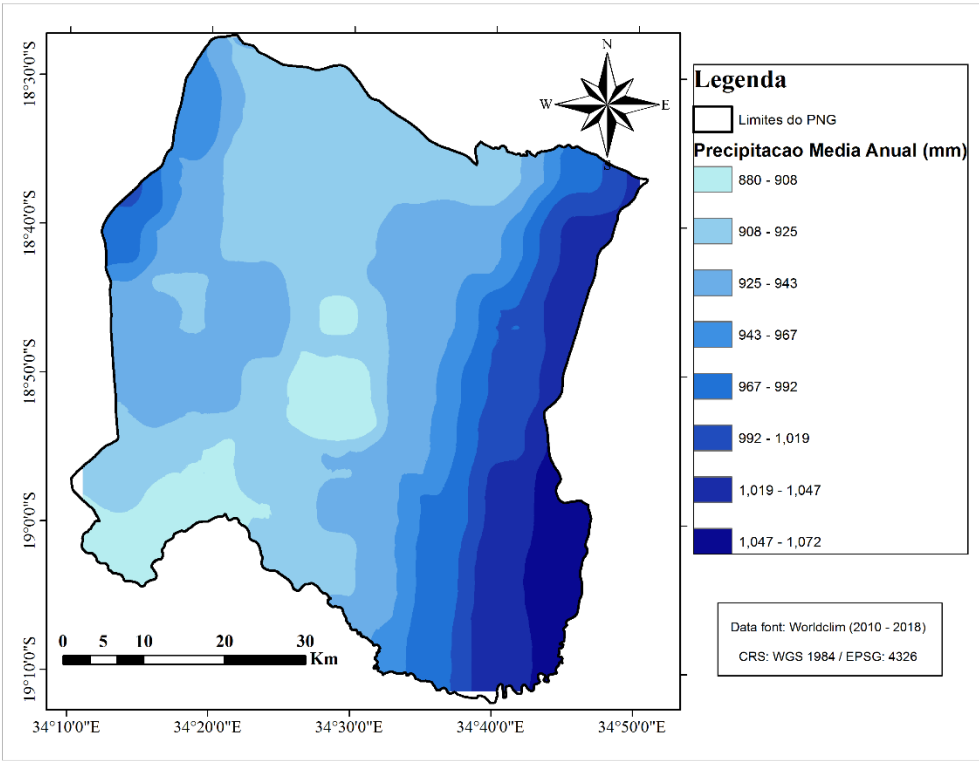


Figura 7: Precipitação Média Anual do Parque Nacional da Gorongosa

Fonte de dados: World Clim (2010-2018)

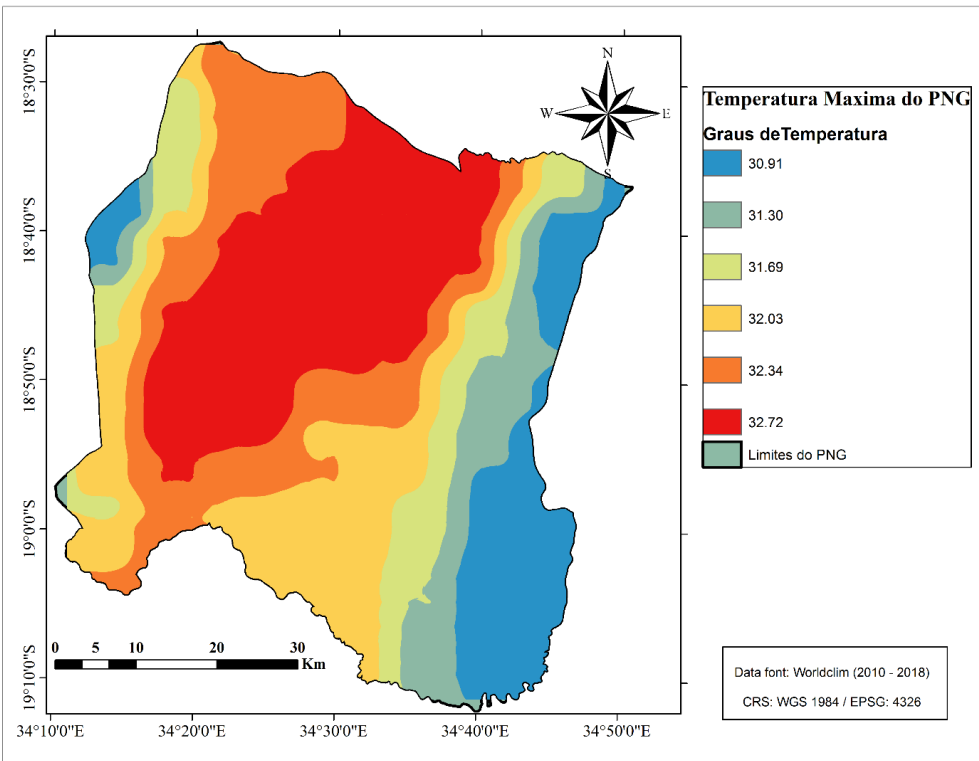


Figura 8: Temperaturas Máximas do Parque Nacional da Gorongosa

Fonte de dados: World Clim (2010-2018)

3.1.5. Vegetação do PNG

Segundo Stalmans e Beilfuss (2008) citado por BR (2016), o PNG apresenta 15 paisagens diferentes espalhadas pelas quatro (4) regiões fisiográficas:

- Pradarias de Montanhas Inferiores e Paisagem de Formações Lenhosa da Gorongosa;
- Pradarias de Montanha e Paisagem de Formações Lenhosas de Arbustos da Gorongosa;
- Paisagem de Formações Lenhosas de Montanha da Gorongosa;
- Paisagem de Miombo Húmido da Região Central (*Midlands*);
- Paisagem de Miombo Seco e de Floresta Mista da Região Central (*Midlands*);
- Paisagem Aluvial da Região Central (*Midlands*);
- Paisagem *Inselberg* da Região Central (*Midlands*);
- Paisagem do Cone Aluvial do Vale do Rift
- Paisagem Fluvial e de Planície de Inundação do Vale do Rift;
- Paisagem do Cone Coluvial do Vale do Rift;
- Paisagem do Lago Urema do Vale do Rift; Região do Planalto de Cheringoma;
- Paisagem de Declives de Calcário Arenito em direção ao Rift do Planalto de Cheringoma;
- Paisagem de Declives Argilosos de Arenito em direção ao Rift do Planalto de Cheringoma;
- Paisagem de Falésias Calcárias do Planalto de Cheringoma.

Dgedge et al., (2016), refere que a maior parte da área do Parque Nacional da Gorongosa corresponde a área de savana, onde predominam as espécies herbáceas e arbustivas de pequeno porte. Essa área de savanas encontra-se ajustada no sector central do parque que corresponde à região topograficamente mais deprimida e plana. No sector oriental, encontram-se as principais áreas de floresta densa e de transição, ocupando uma área significativamente mais reduzida. Segundo o mesmo autor, o PNG é constituído por 6 (seis) tipos de vegetação que são: vegetação de savana; vegetação muito esparsa; vegetação de transição floresta/matos; vegetação esparsa de planície de inundação; Floresta esparsa; e Floresta densa (Figura 8).

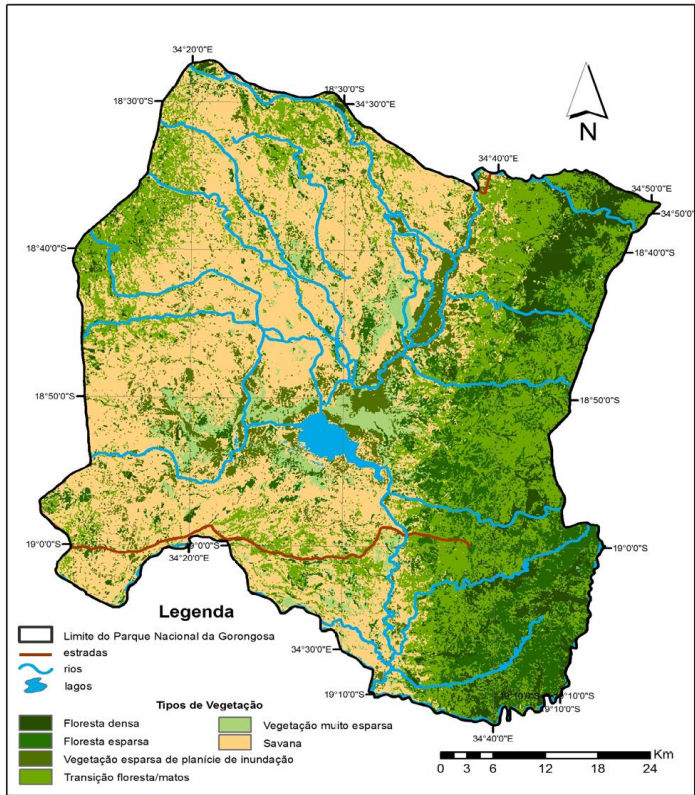


Figura 8: Mapa dos tipos de vegetação do Parque Nacional da Gorongosa

Fonte: Dgedge et al., (2016)

3.1.6. Fauna do PNG

Segundo Schneider et al., (2005) citado por Francisco (2016), Moçambique alberga uma das maiores diversidades faunística de África, sendo 1000 espécies de invertebrados, 10 espécies de peixes na Serra da Gorongosa, 11 espécies de peixes no Lago Urema, 35 espécies de anfíbios, 34 espécies de répteis, 398 espécies de aves e 21 espécies de mamíferos.

Antes da guerra civil o PNG albergava uma grande diversidade de fauna com maior atracção turística; contudo, a guerra civil e a pressão humana através da caça furtiva sobre a fauna levou ao declínio de mais de 90% de populações de mamíferos de grande porte, incluindo elefantes (*Loxodonta africana*), hipopótamos (*Hipopotamus amphibius*), búfalos (*Syncerus caffer*), zebras (*Equus quagga*) e leões (*Panthera leo*) (PNG, 2014). Quando a paz retornou ao país em 1992, a gestão do parque começou a ser restabelecida em 1995 com um programa de restauração ecológica, o qual inclui reintroduções de animais bravios e reforço na capacidade de fiscalização. Os efetivos das espécies de mamíferos de médio e grande porte aumentaram nos últimos 17 anos (PNG, 2014). Contudo, a diversidade e abundância de répteis e anfíbios pode não ter sido afetada pela pressão

da caça furtiva devido ao relativamente baixo valor social e económico destes grupos taxonómicos para as comunidades locais.

3.2. Materiais e Métodos

3.2.1. Materiais

Para a realização do estudo de avaliação do Risco de Incêndios Florestais (RIF) no Parque Nacional da Gorongosa, por meio da aplicação da modelagem *fuzzy*, foram necessários materiais tais como:

- **Computador:** Usado para o armazenamento e gerenciamento de dados;
- **Aplicativo QGIS 3.0:** Para o pre-processamento (correção atmosférica das imagens);
- **ArcGIS 10.5:** Usado para o pré-processamento de imagens de satélites (Reamostragem, delimitação e recorte da área de interesse, geração de mapas de uso e ocupação da terra, geração de mapas de declividade, orientação de relevo e mapa de estradas) e o processamento (avaliação da influência ao RIF de cada variável de estudo nos mapas, modelação *fuzzy* dos mapas e geração do mapa de variabilidade espacial do RIF);
- **Aplicativo Google Earth Pro:** Para a colecta de amostras de treinamento, confirmação/verificação e validação das classes mapeadas e selecionadas; Delimitação das zonas habitacionais, cálculo de áreas e perímetros.
- **Imagens/dados espaciais:** Para a manipulação, análise e interpretação gerando resultados.

3.2.2. Métodos

Para a realização do presente estudo, foi empregue o modelo *fuzzy* descrito por Juvanhol (2014), em combinação com as metodologias de Neder (2019), Mathe (2013), Motta (2008) e tendo sido avaliadas as seguintes variáveis de estudo: Uso e ocupação da terra, Declividade, Orientação do relevo, Proximidade às estradas, Proximidade às zonas habitacionais e a Densidade dos focos de calor. As informações complementares referentes as actividades associadas aos eventos de incêndios, assim como as técnicas de combate e prevenção usados pelas comunidades locais, foram adquiridas mediante o processo de inquérito na área de estudo. Foi aplicada amostragem não probabilística, onde foram inquiridas 11 aldeias comunitarias incluindo o parque. Para cada aldeia foi inquirido 1 chefe (representante) e 4 outros membros comunitários (anexo IV).

A estrutura metodológica para a realização do presente trabalho encontra-se esquematizada na figura do anexo V.

3.2.3. Base de dados

Para a obtenção da varável de uso e ocupação da terra, usou-se imagens digitais correspondentes à área do PNG, disponibilizadas pelo satélite Sentinel-2 mediante o acesso a página <https://earthexplorer.usgs.gov>. O satélite Sentinel-2, apresenta um sensor MSI (*Multi Spectral Instrument*) de 13 bandas espectrais que lhe permite gerar imagens de alta e média resolução (10, 20 e 60 metros), e a sua resolução temporal é de 5 dias, podendo diminuir em função da latitude.

A base de dados para a obtenção da declividade e orientação do relevo, foi adquirida na página <https://earthexplorer.usgs.gov>, onde foram extraídas imagens MDE (Modelo Digital de Elevação) disponibilizadas pela Missão de Topografia de Radar Transportado (SRTM). Os produtos da SRTM, são fornecidos pela NASA JPL após sua captura pelo sensor SAR da nave espacial Endeavour que opera nas bandas C e X, com uma capacidade de gerar imagens MDE de 3 a 1 segundo de arco (resolução espacial de 90 a 30 m) (NASA, 2020).

Os dados referentes a zonas habitacionais, obtiveram-se perante análise das imagens espaciais, bem como a sua digitalização (ferramenta DRAW POLIGON) no aplicativo Google Earth pro.

A base de dados referentes as estradas nacionais (principais), foi adquirida no departamento do curso de Engenharia Florestal do Instituto Superior Politécnico de Gaza. Os dados referentes às vias secundárias e de acesso ao interior da área de estudo, foram adquiridos no departamento dos Sistemas de Informação Geográficas do Parque Nacional da Gorongosa, e pela digitalização das imagens no Google Earth Pro.

Os dados de focos de calor, obtiveram-se no sistema de Informações sobre Incêndios para o Gerenciamento de Recursos da NASA (*FIRMS-NASA*), mediante o acesso a página <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>. O *FIRMS-NASA*, disponibiliza dados de incêndio activos em tempo quase real, dentro de 3 horas após a observação pelos satélites NOAA-20, AQUA, TERRA e Suomi NPP. Para além da disponibilização dos dados de incêndios em tempo real, os dados históricos de focos de calor podem ser acessados e são disponibilizados em três formatos tais como: SHP, KML, TXT, WMS. Os satélites AQUA e TERRA são de órbita polar, equipados com sensor MODIS (Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada); o satélite NOAA-20, também é de órbita polar, porém, este possui sensor AVHRR e VIIRS (Radiômetro de Imagem por Infravermelho Visível) (NASA, 2020).

3.2.4. Pré-Processamento (Geração das Variáveis de Estudo)

3.2.4.1. Uso e Ocupação da Terra

Para o mapeamento do Uso e Ocupação da Terra, primeiramente foi realizada a composição colorida (cor verdadeira) das bandas espectrais (R-04, G-03 e B-02) das imagens do Sentinel-2, através do uso da ferramenta *COMPOSITE BAND* do *software* ArcGIS 10.5. De seguida, as imagens foram submetidas ao processo de correção atmosférica usando o complemento SCP (*Semi-Automatic Classification Plugin*) no aplicativo computacional QGIS 3.0, de modo a minimizar ou eliminar os efeitos da absorção da radiação pelos gases, bem como, o espalhamento produzido por partículas de aerossóis.

Após execução do processo de correção atmosférica, realizou-se a delimitação da área de interesse (área de estudo) mediante a sobreposição do dado vectorial dos limites do PNG no ArcGIS 10.5, e de seguida fez-se o recorte da imagem matricial com a aplicação da ferramenta *EXTRACT BY MASK* de modo a permitir que se obtenha apenas a imagem com os limites do PNG.

Depois da obtenção da imagem com os limites da área de estudo, foi feita a projecção do sistema de referenciamento de coordenadas (WGS 1984_UTM Zone 36S), e seguidamente se procedeu com o processo de digitalização da imagem, mediante a técnica de fotointerpretação visual (coleta das amostras de cada classe de uso e ocupação da terra). A coleta de amostras de treinamento fez-se mediante a execução da ferramenta *DRAW POLYGON* no classificador de imagens do ArcGIS 10.5, em uma escala que permitiu a melhor visualização dos elementos da imagem matricial do PNG e com o auxílio das assinaturas amostrais das classes que previamente foram visitadas e adquiridas no aplicativo Google Earth Pro.

Após ter-se realizado o processo de coleta de amostras, a classificação (supervisionada) da imagem matricial, deu-se mediante o agrupamento das frequências dos pixéis de cada classe no ArcGIS 10.5, baseando-se nas unidades amostras previamente coletadas (método de Máxima verossimilhança), dando origem ao mapa de uso e ocupação da terra que melhor representa a realidade da área em estudo (Figura 9). Na posse do mapa de uso e ocupação da terra, procedeu-se com as etapas de validação e reclassificação dos valores do mapa para posteriormente aplicação da modelagem *fuzzy*.

3.2.4.1.1. Validação do Mapa de Uso e Ocupação da Terra

A validação do mapa classificado, foi feita mediante a avaliação da exatidão do processo de classificação (índice de exatidão Kappa) no ArcGIS 10.5, em comparação com o mapa de uso e ocupação da terra fornecido pelo departamento de SIG do PNG.

Para Amade (2014), o índice Kappa é o método mais usado na avaliação das classificações e permite estimar a qualidade dos resultados obtidos. No cálculo desse índice, inclui-se todos os elementos da matriz de erros (erro de omissão, erro de comissão), possibilitando dessa forma, fazer a melhor medição do grau de concordância entre o mapa classificado e a realidade do campo (Equação 1).

$$K = \frac{\sum_{i=1}^l x_{ii} \sum_{i=1}^l (x_i + x + i)}{2n - \sum_i (x_i + x + i)} \quad (1)$$

Onde:

K = Índice de exatidão Kappa;

l = n° de linhas da matriz quadrada;

x_{ii} = n° de observações na linha i e da coluna i ;

$x_i + x + i$ = total marginal de linha i e coluna i , respectivamente;

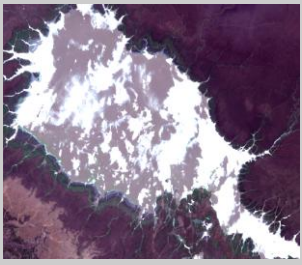




n = número total de amostras.

3.2.4.1.2. Reclassificação dos Valores do Mapa de Uso e Ocupação da Terra

De modo a permitir que os valores de entrada do mapa de uso e ocupação da terra, sejam modelados pela função *FUZZY Gaussian*, foi feito o processo de reclassificação de acordo com Juvanhol (2014) e Neder (2019), onde para as classes que apresentam maior susceptibilidade ao incêndio são atribuídos valores que se encontram na posição central do conjunto $[x_1 a x_n]$ e para as classes que apresentam menor susceptibilidade, são atribuídos valores das extremidades.

A reclassificação deu-se mediante a execução da ferramenta *RECLASSIFY (3D ANALYST)* no ArcGIS 10.5 (Tabela 1).

Tabela 1: Valores de Reclassificação das Classes de Uso e ocupação da Terra do PNG

Imagem	Classe de Uso e Ocupação da Terra	Descrição	Valores de Reclassificação
	Água	Fontes de água correspondente a lagos, rios e riachos que potenciam negativamente o risco de ocorrência e propagação do incêndio.	0
	Zonas de Inundação/ Pastagens	Áreas periodicamente húmidas com predominância de herbáceas, gramíneas e pequenos arbustos (material de alta inflamabilidade e rápida propagação).	15
	Solo Exposto/ Habitação	Áreas sem vegetação que permitem livre circulação do ar e suprimento de oxigénio ao incêndio; Áreas infraestruturadas e de forte influência do homem (principal causador de incêndios).	20
	Floresta Esparsa/Savanas	Áreas com arbustos e árvores esparsas (pequeno e medio porte), acompanhadas pela predominância de gramíneas e herbáceas ao longo de sua extensão. Essas áreas influenciam no agravamento ou mudança do tipo de incêndio (incêndio de superfície para incêndio de copa).	30
	Floresta Densa	Áreas de vegetação alta e fechada com pouca influência das acções humanas.	40

3.2.4.2. Declividade e Orientação do Relevo

Para a elaboração do mapa de declividade e de orientação do relevo, foi usada uma imagem do Modelo Digital de Elevação (MDE) da SRTM (Missão de Topográfica de Radar Transportado), onde após sua aquisição, foi submetida ao processo de reprojeção do sistema de referenciamento de coordenadas e posterior reamostragem de pixels (de 30m para 10m) pela ferramenta *RESAMPLE* no ArcGIS 10.5. De seguida, a imagem foi submetida ao processo de preenchimento de lacunas (ferramenta *FILL*), delimitação e recorte da área de interesse (ferramenta *EXTRACT BY MASK*). Após obtenção e correção do MDE correspondente a área de estudo, fez-se o cálculo da declividade mediante a execução da ferramenta *SLOPE*, obtendo dessa forma o mapa da declividade do terreno.

Para a obtenção do mapa de orientação do relevo, executou-se a ferramenta *ASPECT* que permite detectar os aspectos da transformação do relevo na imagem MDE. De seguida o mapa de orientação do relevo foi submetido ao processo de reclassificação dos valores de entrada, mediante a ferramenta *RECLASSIFY (3D ANALYST)*. A atribuição dos novos valores deu-se de acordo com a tabela abaixo, onde para as faces que recebem maior quantidade de energia solar foram atribuídos valores mais elevados, e os valores baixos foram atribuídos às faces que consequentemente recebem menor quantidade de energia.

Tabela 2: Valores de Reclassificação dos aspectos da orientação do relevo

Classes	Orientação do Relevo (°)	Valores de Reclassificação
Relevo Plano	[-1 - -0.000001[	30
Faces Norte	]0.000001 - 22.5[	170
Faces Nordeste	]22.5 - 67.5[	110
Faces Leste	]67.5 - 112.5[	70
Faces Sudeste	]112.5 - 157.5[	50
Faces Sul	]157.5 - 202.5[	10
Faces Sudoeste	]202.5 - 247.5[	90
Faces Oeste	]247.5 - 292.5[	150
Faces Noroeste	]292.5 -337.5[	130
Faces Norte	]337 - 360]	170

3.2.4.3. Proximidade à Estradas

Para a obtenção dessa variável, foram usados dados vectoriais de estradas que após sua aquisição, georreferenciamento e recorte, foram determinadas as suas áreas de influência directa ao risco de incêndios (no ArcGIS 10.5), mediante a execução da ferramenta *BUFFER*. Para as estradas principais e vias secundárias, foi aplicado um *buffer* de 100 e 50 m respectivamente, e para as vias de acesso foi aplicado um *buffer* de 25 m, de acordo com a metodologia descrita por Juvanhol (2014). De seguida fez-se o cálculo da distância euclidiana com a ferramenta *EUCLIDEAN DISTANCE*.

3.2.4.4. Proximidade às Zonas Habitacionais

Para a obtenção da variável de proximidade das zonas habitacionais, primeiramente mapeou-se as áreas de influência directa de cada zona habitacional no PNG. Esse mapeamento, fez-se mediante a execução da ferramenta *DRAW POLYGON* do Google Earth Pro que permitiu desenhar polígonos cobrindo cada uma das regiões habitadas.

Os polígonos representativos de cada zona foram posteriormente exportados para o ArcGIS 10.5, onde pela execução da ferramenta *EUCLIDEAN DISTANCE*, procedeu-se o cálculo de proximidade às zonas habitacionais, indicando dessa forma as suas distâncias de influência ao risco de ocorrência de incêndios. A distância de influência directa considerada para as zonas habitacionais foi de 1500 m, pois abaixo dessa distância, as actividades antrópicas tais como: a prática de actividades de agricultura, pastagens e corte de estacas para as habitações, são verificados com frequência.

3.2.5. Processamento das Variáveis (Modelagem *fuzzy*)

3.2.5.1. Fuzzyficação das Variáveis de Estudo

Nessa fase de processamento, foram atribuídas funções de pertinência *Fuzzy* para cada uma das variáveis de entrada, seguindo as etapas descritas por Juvanhol (2014), permitindo o estabelecimento de graus de certeza em cada um dos conjuntos das variáveis no intervalo de 0 a 1; sendo valor 0 (zero) o indicador da ausência do risco (risco nulo) e o valor 1 (um), o indicador da presença de maior risco. A categorização do risco para cada uma das variáveis, foi feita aplicando o método de reclassificação natural de Jenks que basea-se nas quebras e transições naturais dos aspectos comuns da variável, pelo ArcGIS 10.5 (Biazatti, et al., 2020 & Oliveira, et al., 2017).

➤ **Uso e Ocupação da Terra**

Para esta variável, foi atribuída a função de pertinência *FUZZY Gaussian* que permite a padronização dos valores de entrada da imagem matricial, definindo a sua distribuição normal em torno de um ponto central. Os valores das classes que exercem maior influência ao risco são agrupados na região central e os valores das classes de menor influência ao risco, são agrupados nas extremidades da curva da função de pertinência. Essa função permite uma melhor definição da distribuição gaussiana (normal) das características representadas por diferentes classes de uso e ocupação da terra, preservando as transições comuns da região em análise. O grau de propagação da curva considerado nessa variável, para a predição do risco foi de 0.1 (Função 1).

$$\mu(x) = \exp^{-\delta*(x-a)^2} \quad (1)$$

Onde:

δ – Parâmetro que determina a inclinação ou propagação da curva;

X – Valor da classe de uso e ocupação da terra na imagem matricial;

a – Corresponde ao valor do ponto médio que define o ponto central para a função, em que $\mu(x)$ adquire 1.

➤ **Declividade**

Para essa variável, usou-se a função *FUZZY Large* que permite representar a variação do grau de pertinência dos valores de entrada da imagem matricial, de modo que, os valores elevados tenham maior probabilidade de pertencer ao conjunto que assume valor 1; definindo a forma e a característica da zona de transição. A função *Fuzzy Large*, consegue ter maior eficácia na distribuição crescente dos graus de declividade, conservando as formas e transformações originais do terreno. Para esta variável, o grau de propagação da curva considerado para melhor medição dos diferentes níveis de risco foi de 0.3 (Função 2).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{E}\right)^{-d}} \quad (2)$$

Onde:

X – Valor da declividade (°) na imagem matricial;

E – Valor do ponto médio que define o ponto central da função, em que $\mu(x)$ adquire 0.5;

d – É o parâmetro que determina a inclinação da propagação da curva.

➤ **Orientação do Relevo**

Para essa variável, lhe foi atribuída a função *FUZZY Large*, permitindo que os valores de entrada (reclassificados) da imagem matricial, sejam distribuídos de tal forma que os valores elevados tenham maior probabilidade de pertencer ao conjunto que assume valor 1; definindo a forma e a característica da zona de transição. Para essa variável, a função *Fuzzy Large*, consegue fazer uma boa distribuição crescente dos valores reclassificados que representam cada face do terreno, conservando a orientação original do relevo. O grau de propagação da curva da função, usado para esta variável foi de 0.3 (Função 3).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{R}{E}\right)^{-d}} \quad (3)$$

Onde:

R – Valor reclassificado que representa cada face da orientação do relevo na imagem matricial;

E – É o valor do ponto médio que define o ponto central da função, em que $\mu(x)$ adquire 0.5;

d – Parâmetro que determina a inclinação da propagação da curva.

➤ **Proximidade às Estradas e às Zonas Habitacionais**

Essas variáveis foram analisadas mediante a aplicação da função *FUZZY Small*, permitindo representar a variação do grau de pertinência dos valores de entrada de cada imagem matricial. Para essa função, os valores menores apresentam maior probabilidade de pertencerem ao conjunto que assume valor igual a 1. Essa função permite detectar múltiplas distâncias de influências ao risco, em relação a um determinado ponto ou área em análise. O grau de propagação da curva considerado nessas variáveis, foi de 1 (Função 4).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{X}{C}\right)^b} \quad (4)$$

Onde:

X – Valor da distância à estradas/ zonas habitacionais (m) na imagem matricial;

C- É o valor no ponto médio que define o ponto central da função, em que $\mu(x)$ adquire 0.5;

b – É o parâmetro que determina a inclinação ou propagação da curva.

3.2.5.2. Defuzzyficação das Variáveis e Validação do Mapa de ROIF

Para Juvanhol (2014), as variáveis de estudo que exercem influência sobre o início e a propagação do incêndio, devem ser combinadas por meio de uma análise de sobreposição, de modo a indicar a possibilidade de a célula da imagem matricial pertencer ou não a um dado conjunto *Fuzzy* das demais variáveis pelos critérios de múltiplas entradas.

Nesse contexto a defuzzyficação das variáveis foi feita mediante a análise de sobreposição, aplicando-se o operador *FUZZY Gamma* no ArcGIS 10.5. O operador *FUZZY Gamma*, é segundo Juvanhol (2014) o produto algébrico da soma das funções *fuzzy* (*FUZZY Sum*) e o produto das funções *fuzzy* (*FUZZY Product*), ambas elevadas a potência gama (Modelo 4).

$$\mu(x) = \{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)\}^\gamma * \{\prod_{i=1}^n \mu_i\}^{1-\gamma} \quad (4)$$

Onde:

μ_i - Valores da associação *Fuzzy* para $i= 1,2,3,\dots,n$;

n - Corresponde ao número de variáveis de estudo, ou seja, a camada de dados *raster*;

γ - Coeficiente com valores entre 0-1.

A validação do mapa de risco de ocorrência de incêndios florestais no PNG, foi feita mediante a sobreposição dos dados pontuais de focos de calor que representam os eventos de incêndios ocorridos de 01 de Janeiro a 07 de Outubro de 2022. Permitindo dessa forma a medição do nível de assertividade do modelo.

3.2.5.3. Cálculo de Áreas

Após categorização das variáveis procedeu-se com o cálculo de áreas no ArcGIS 10.5 de modo a permitir melhor percepção da dimensão e interpretação dos eventos no terreno. Os cálculos deram-se mediante o uso da ferramenta *FIELD CALCULATOR* na tabela de atributos. Para se proceder com os cálculos das áreas foi necessário tomar como base a resolução espacial de cada imagem, sendo que, durante a fase do pré-processamento as imagens foram calibradas para uma resolução de 10 m, correspondente a uma área de 100 m² por pixel, elevando dessa forma o nível de detalhamento (Equações 2,3,4,5 e 6).

➤ Área de cada classe (m²)

$$A_c = \sum P_c * a_p \quad (2)$$

Onde: A_c – Área da classe; $\sum P_c$ – Total de pixéis da classe; e a_p – área do pixel baseada na resolução espacial da imagem (100).

➤ **Área total de cada variável (m²)**

$$A_t = \sum_{i=1}^n A_{c_i} \quad (3)$$

Onde:

A_t – Área total da variável em estudo; e

$\sum A_c$ – somatório de áreas de cada classe da variavel em estudo, sendo $i = 1,2,3..n$.

➤ **Área de cada classe (ha)**

$$A_{cha} = \frac{A_c}{10000} \quad (4)$$

Onde:

A_{cha} - Área da classe em hectares; e

A_{cA} - Área da classe em m².

➤ **Área total de cada variável (ha)**

$$A_{tha} = \sum_i^n A_{cha_i} \quad (5)$$

Onde:

A_{tha} - Área total da variavel em estudo em hectares; e

$\sum A_{cha}$ -somatorio das áreas em hectares de cada classe da variavel em estudo, sendo $i = 1,2,3...n$.

➤ **Área percentual de cada classe (%)**

$$A_{c\%} = \frac{A_c}{A_t} * 100 \quad (6)$$

Onde:

$A_{c\%}$ - Área percentual da classe;

A_c - Área da classe em m²; e

A_t - Área total da variável em estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Uso e Ocupação da Terra

O mapeamento das formas de uso e ocupação da terra, permitiu a representação, compreensão e posterior avaliação dos padrões de organização das paisagens, assim como as actividades antrópicas que influenciam para o risco de ocorrência de incêndios na unidade do Parque Nacional da Gorongosa. Das formas de uso e ocupação da terra predominantes no PNG, encontra-se a Floresta Esparsa/Savanas com 1929.450 Km², Floresta Densa com 1181.327 Km², Zonas de Inundação/Pastagens com 392.186 Km², Solo exposto/ Habitação com 160.261 Km² e por fim as zonas ocupadas pelas Águas com 24.750 Km²; estas ocupações correspondem a 52.3, 32.0, 10.6, 4.4 e 0.7 % do total da área de estudo respectivamente.

Foi caracterizada como Floresta Esparsa/Savanas, as formações vegetais de baixa densidade que apresentam arbustos e árvores esparsas (pequeno a medio porte), acompanhadas pela predominância de gramíneas e herbáceas ao longo da sua extensão. As fronteiras norte e Oeste do PNG, correspondem as áreas de maior concentração habitacional e as suas comunidades, exercem uma forte influência (abertura de áreas para machambas, pastagens, novas habitações) no aumento de áreas da vegetação esparsa e consequentemente redução das áreas da vegetação densa. De acordo com Dgedge et al., (2016), a floresta de savanas corresponde a maior ocupação no PNG e encontra-se estabelecida na parte mais deprimida e aplanada topograficamente.

A Floresta Densa corresponde a segunda maior ocupação e encontra-se estabelecida maioritariamente na zona leste e ao longo dos cursos dos rios no PNG; nota-se também, algumas formações vegetais densas que se estendem nas extremidades sul e oeste da área de estudo. Apesar de essa classe ocupar a segunda maior área do PNG, tem sofrido pressão pelas comunidades residentes no interior do parque e ao longo da zona tampão, há medida que as florestas são devastadas pelas queimadas durante a caça de pequenos mamíferos, produção de mel em colmeias tradicionais (feitas a base de cascas de árvores), abate de árvores para a extensão de campos agrícolas e habitações, produção de lenha e estacas de construção, dificultando o processo de reposição dos ecossistemas. (Cordeiro, 2015; Jequecene, et al., 2017).

Na zona central da área de estudo nota-se a presença de uma extensa zona de inundação, que por sua vez corresponde a áreas de pastagens naturais, estendendo-se maioritariamente nas direções norte-sul e oeste-este. Segundo (BR, 2016), a infinidade de rios e riachos (provenientes da Serra da Gorongosa, da Região Central-*Midlands* e do Planalto de Cheringoma), que são drenados para a região central da área em apreciação (Vale do Rift), provocam inundações regulares que por sua

vez favorecem a predominância de pradarias. Para além de esta região exercer uma influência positiva na diversidade e abundância da vida selvagem, pela disponibilização de água e pasto (Cordeiro, 2015), também traz grandes implicações na gestão e no próprio desenvolvimento do PNG, há medida que impõe severas restrições logísticas e sazonais sobre a construção de infraestruturas turísticas (BR, 2016).

As áreas classificadas como Solo Exposto/Habitação e Água, representam as ocupações menos extensas em relação as classes discutidas anteriormente. Foram classificadas como Solo Exposto/Habitação, áreas que não apresentam nenhuma formação vegetal, correspondente a áreas infraestruturadas, áreas recentemente lavradas, áreas de alguns cursos dos rios que se encontravam secos e ou com notórios bancos de areia e algumas zonas de antiga exploração de pedra. A classe de Água corresponde a todas áreas que se encontram ocupadas pela água, porém, é importante referir que grande parte dos rios e riachos são intermitentes, deixando de correr em épocas secas.

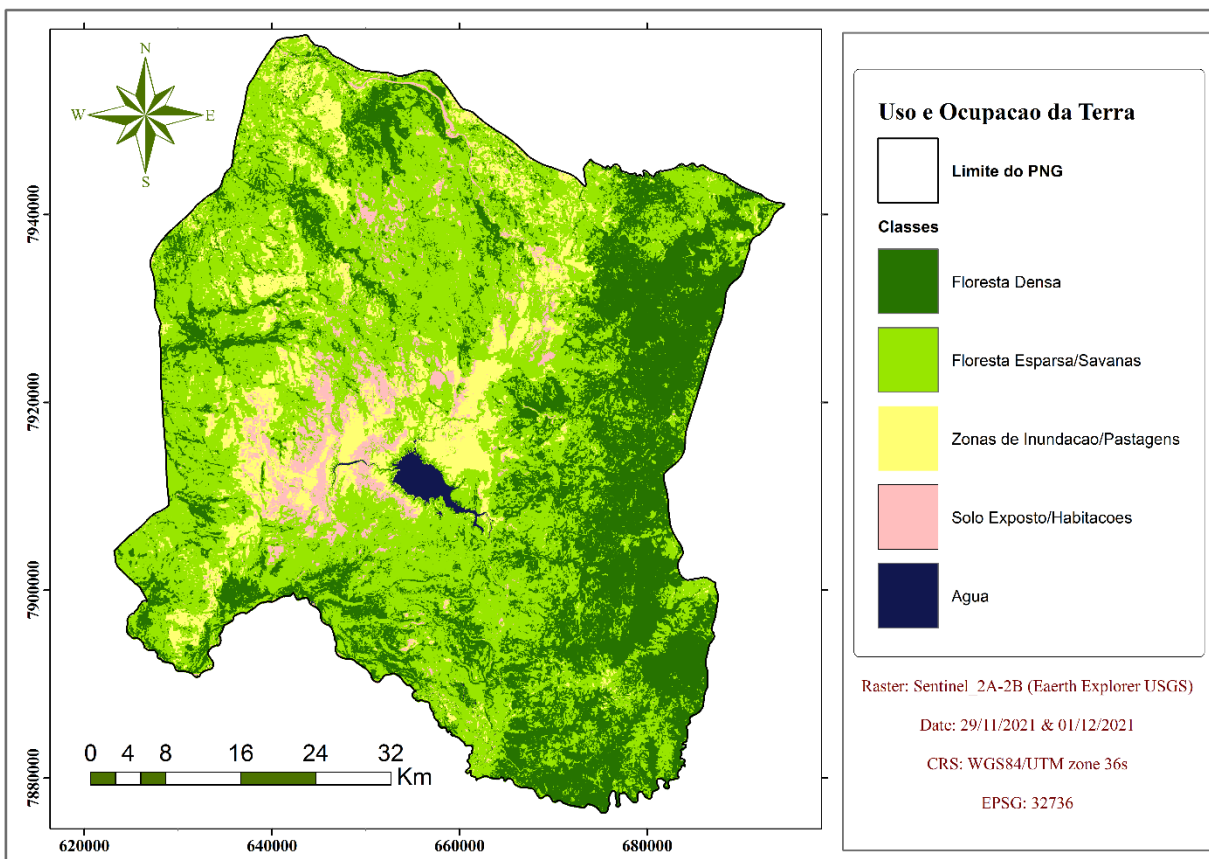


Figura 9: Mapa de Uso e Ocupação da Terra do PNG

Fonte de dados: Sentinel 2A-2B (Earth Explorer-USGS)

4.1.1. Validação do Mapa de Uso e Ocupação da Terra

Durante o processo de validação, foram distribuídos aleatoriamente 2000 pontos amostrais (na área em estudo), dos quais 1945 foram devidamente classificados e 55 pontos foram erradamente classificados (Tabela 3).

Tabela 3: Matriz confusão do processo de avaliação da exatidão da classificação (Índice Kappa)

		Realidade do Campo (UOT)							U-Accuracy	Kappa
		Classes*	C1	C2	C3	C4	C5	Total		
Mapa Classificado (UOT)	C1	620	0	0	1	0	621	0.9984	0	
	C2	9	732	1	11	0	753	0.9721	0	
	C3	0	0	509	12	1	522	0.9751	0	
	C4	4	4	1	74	9	92	0.8043	0	
	C5	1	0	0	1	10	12	0.8333	0	
	Total	634	736	511	99	20	2000	0	0	
	P-Accuracy	0.9779	0.9946	0.9961	0.7475	0.5	0	0.9725	0	
	Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0.9604	

*C1-Floresta Densa; C2-Floresta Esparsa/Savanas; C3-Zonas de Inundação/Pastagens; C4-Solo Exposto/Habitacões; C5-Água.

A classe que teve maior erro de classificação foi a C4 (Solo expotosto/Habitacoes) com 19.57% de erro, sendo que $\frac{1}{2}$ do erro foi concentrado na classe C5 (Água). O erro de classificação entre essas duas classes (C4 e C5), deu-se pelo facto de que a imagem usada para a classificação do UOT é referente a uma época seca em que parte da água do lago Urema encontrava-se turva e com lama, emitindo uma reflectância típica do solo exposto e habitacões. Por tanto, apesar da confusão gerada entre algumas classes durante a classificação, o mapa classificado (UOT) foi considerado de qualidade excelente, tendo-se obtido o índice kappa de 96% (0.9604) de acordo com a ilustração da tabela acima.

De acordo com Amade (2014), a qualidade do mapa classificado pode ser considerado: péssimo se o índice kappa for inferior a 0; ruim se estiver no intervalo de 0 a 0.2; razoável se estiver entre 0.2 a 0.4; boa se assumir valores de 0.4 a 0.6; muito boa se estiver entre 0.6 a 0.8; e excelente se o índice assumir valores no intervalo de 0.8 a 1.

4.1.2. Fuzzyficação da Variável Uso e Ocupação da Terra

A modelagem das classes de uso e ocupação da terra pela função *Fuzzy Gaussian*, mostra que as classes ocupadas pelas águas e floresta densa, apresentam um risco baixo com graus de pertinência variando entre 0 a 0.00392 no conjunto *fuzzy*; a classe de floresta esparsa/ savanas foi classificada como sendo a do risco moderado com valores intermediários de 0.00392 a 0.286 graus; e por fim, o alto risco (0.286 a 1) foi atribuído às classes representadas pelo solo exposto/habitações e campos de pastagens/inundações (Figura 10). Em termos de área, as regiões de risco alto apresentam 552.4 Km², o equivalente a 15% da área total, e as regiões de risco moderado e baixo, apresentam cerca de 1929.4 e 1206.1 Km², o equivalente a 52.3 e 32.7 % respectivamente.

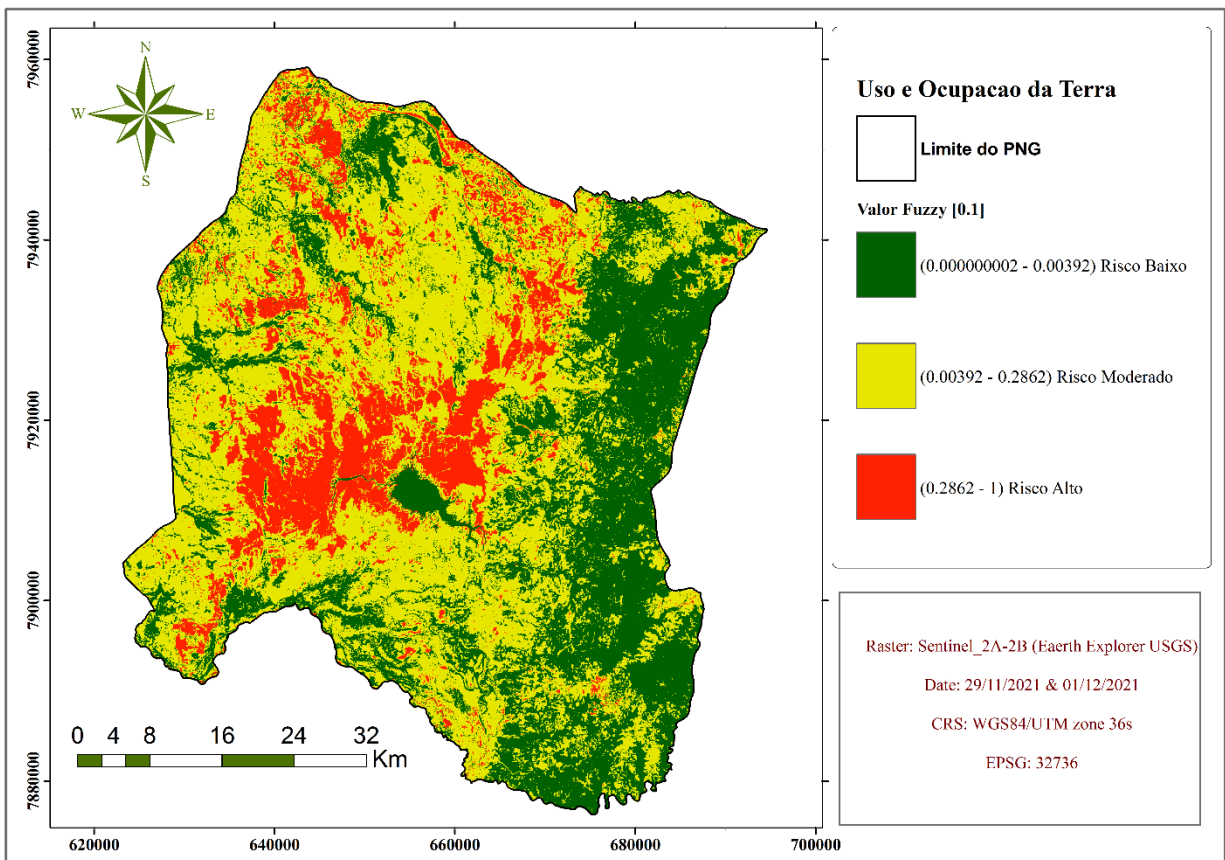


Figura 10: Efeito da função *Fuzzy Gaussian* no Uso e Ocupação da Terra do PNG

Fonte de dados: Sentinel 2A-2B (Earth Explorer-USGS)

De acordo com Oliveira (2002), a cobertura vegetal é o factor responsável pelo fornecimento do material combustível que participa no processo de queima, e a sua variação, implica mudanças relacionadas com o tipo de material combustível, velocidade de propagação e a quantidade de calor libertado em um incêndio (comportamento do fogo).

Para Juvanhol (2014) citando Goldammer (1982), as florestas naturais que se encontram inseridas principalmente em áreas húmidas e vales, agem como barreira natural contra o fogo. Na mesma linha, Soares e Batista (2007) referem que as florestas densas (locais fechados) desfavorecem a infiltração da radiação solar, baixam a temperatura do ar e do material combustível, interrompem a livre propagação de correntes de ar diminuindo dessa forma a velocidade do vento e consequentemente dificultam o desenvolvimento do fogo.

Porém, mesmo apresentando baixa potencialidade para a ocorrência e propagação do fogo, é importante lembrar que as florestas densas produzem materiais combustíveis de diâmetros maiores que durante a queima desenvolvem intenso calor e podem manter-se em combustão latente, com grande capacidade de reiniciar incêndios dados como controlados; por outro lado, as formações vegetais com materiais combustíveis de diâmetros menores (campo graminal e com pequenos arbustos) produzem incêndios de rápida propagação e alta intensidade, podendo favorecer a mudança dos tipos de incêndios (incêndio de base para o incêndio de copa), dificultando o seu combate e elevando o seu nível de perigosidade.

Os campos de pastagens e o solo exposto/habitações correspondem as áreas de forte domínio de influência das ações humanas, na área de estudo (prática de agricultura, pastagens de gado e expansão das zonas de habitação); e de acordo com Mathe (2013) citando Garcia et al., (2009), na actualidade o homem e as suas actividades é o principal responsável ao nível mundial pela maioria dos focos de ignição que provocam incêndios florestais.

4.2. Declividade

O mapeamento dos graus de declividade, permitiu a compreensão das condições impostas para o agravamento do risco de incêndios, para além de compreender também os padrões de organização da área em relação a inclinação. O Parque Nacional da Gorongosa, apresenta regiões declivosas/aclivosas que variam de 0 a 55°, distribuídas de forma padronizada, sendo os menores graus predominantes na região central e os maiores graus na medida em que se vai em direcção às extremidades Leste e Oeste (figura 11).

Cerca de 70.70% da área apresenta um relevo considerado plano (0°-3°), correspondente a maior área do PNG; o relevo suavemente ondulado (3°-5°) ocupa a segunda maior posição com 20.52% de área, seguido dos relevos ondulado (5°-10°) e fortemente ondulado (10°-15°) com 7.0 e 1.17% respectivamente. Os relevos montanhosos (15°-30°) e fortemente montanhosos (30°-55°), ocupam as menores áreas com cerca de 0.6 e 0.005% na mesma ordem (Tabela 4)

Tabela 4: Classes dos graus de Declividade e suas respectivas áreas

CLASSES	Declividade do Terreno (°)	Área (m ²)	Área (ha)	Área %
Relevo Plano	[0 -3[	2607320400	260732.04	70.701528
Relevo Suavemente Ondulado	[3 -5[	756675000	75667.5	20.518414
Relevo Ondulado	[5 - 10[	258134500	25813.45	6.9997164
Relevo Fortemente Ondulado	[10 -15[	43440300	4344.03	1.177951
Relevo Montanhoso	[15 -30[	22014300	2201.43	0.5969518
Relevo Fortemente Montanhoso	[30 - 55...]	200600	20.06	0.0054396
TOTAL		3687785100	368778.51	100

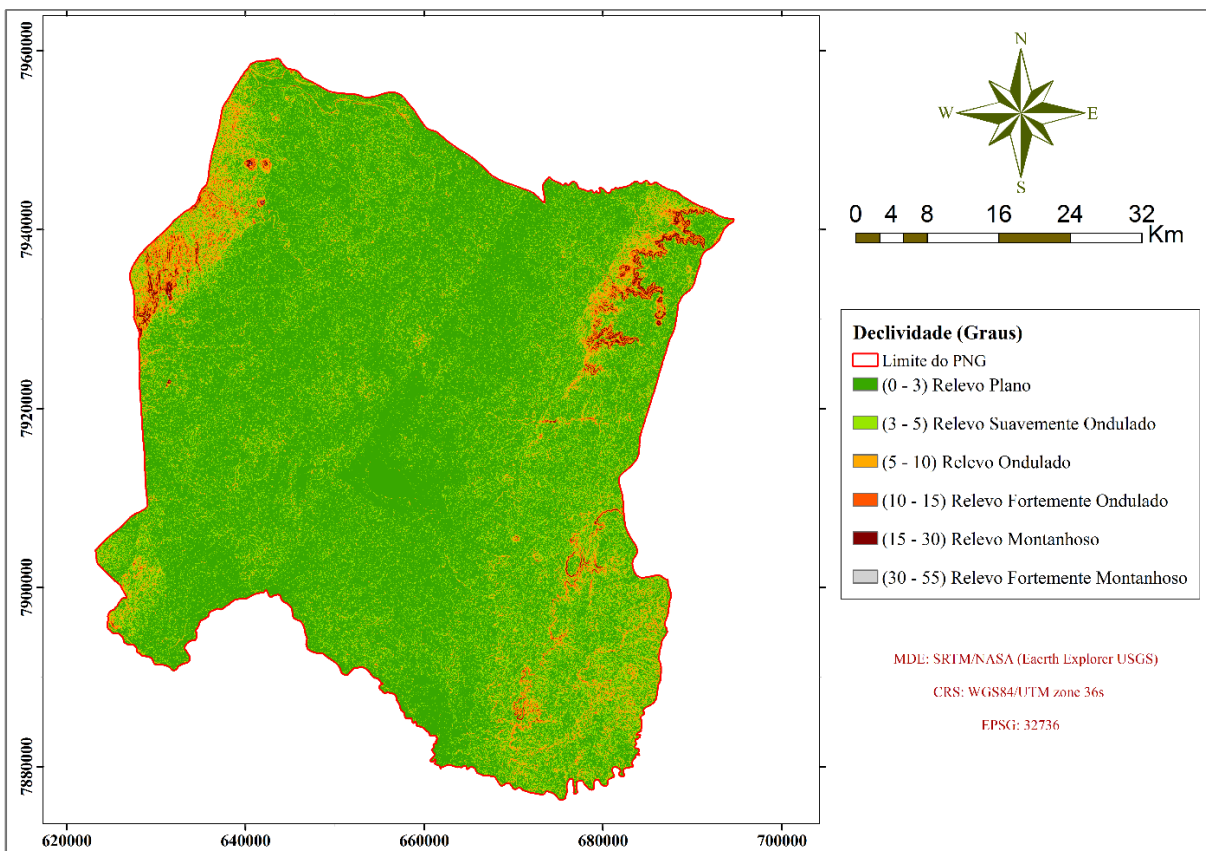


Figura 11: Mapa de Declividade do Terreno do PNG

Fonte de dados: SRTM (Earth Explorer-USGS)

As variações de declividade numa determinada região, representam um dos factores de maior importância, para adopção de um determinado comportamento de propagação do fogo, agindo influentemente nas diferentes formas de transmissão de energia (convecção e radiação).

Lorenzon et al., (2018), refere que o factor declividade age directamente sobre o comportamento do fogo influenciando principalmente a velocidade e direcção de propagação, há medida em que os focos secundários de incêndios, são originados a partir de materiais em combustão que se deslocam (deslizamento) para abaixo (transferência de massa).

Por outro lado, FMIA (2000) citado por Juvanhol (2014), defende que a declividade condiciona o ângulo de exposição do combustível à radiação térmica e chamas durante o processo de queima, potenciando o processo perda de humidade do material à frente da linha do fogo, tornando-o altamente vulnerável à queima. Por tanto, pode-se concordar com a ideia de que as áreas de maiores aclives ou declives no PNG são propensas a um elevado risco de ocorrência e propagação de incêndios.

Para Soares e Batista (2007), um incêndio que se propaga em um aclive acentuado, assemelha-se a um incêndio que se propaga em um nível plano, sob forte efeito de vento, e à medida que o grau de inclinação aumenta, a velocidade de propagação também aumenta. Nas regiões de aclives e declives com acúmulo de material combustível acima da frente de fogo, ocorre um maior aquecimento e perda de humidade dos combustíveis, alimentando o fogo com maior rapidez.

4.2.1. Fuzzyficação da Variável Declividade

Conforme discutido anteriormente, a declividade interfere de maneira significativa para o aumento do risco de ocorrência e propagação de incêndios florestais. O processo de fuzzyficação dos graus de declividade pela função *Fuzzy Large*, mostra que o PNG apresenta um risco de incêndios florestais que varia de baixo a alto; sendo que os riscos baixo (0 a 0.06) e moderado (0.06 a 0.23) foram atribuídos às regiões próximas do lago Urema e em toda região central do vale do rift. Estas regiões, correspondem maioritariamente às áreas de relevo considerado plano. O risco alto (0.23 a 1), corresponde a regiões topograficamente elevadas e com predominância de grandes declives.

Em termos de área, o PNG apresenta cerca de 61.4 Km² (1.7% da área total) que estão na condição de risco alto e estas regiões localizam-se ao longo das extremidades Leste e Oeste, com destaque nas zonas Noroeste, Nordeste, Sudeste e Sudoeste do parque. As regiões classificadas como sendo de risco moderado e baixo apresentam áreas de 529.3 e 3078.4 Km², correspondente a 14.4 e 83.9% respectivamente. (Figura 12). Nesse sentido, é importante que a prática de acções de prevenção (estabelecimento de postos permanentes de vigilância e mobilização contínua de equipas de combates) sejam realizadas em locais de aclives acentuados de modo a minimizar o efeito do fogo

sobre paisagens em que a declividade determina o tipo, quantidade e disposição do material combustível.

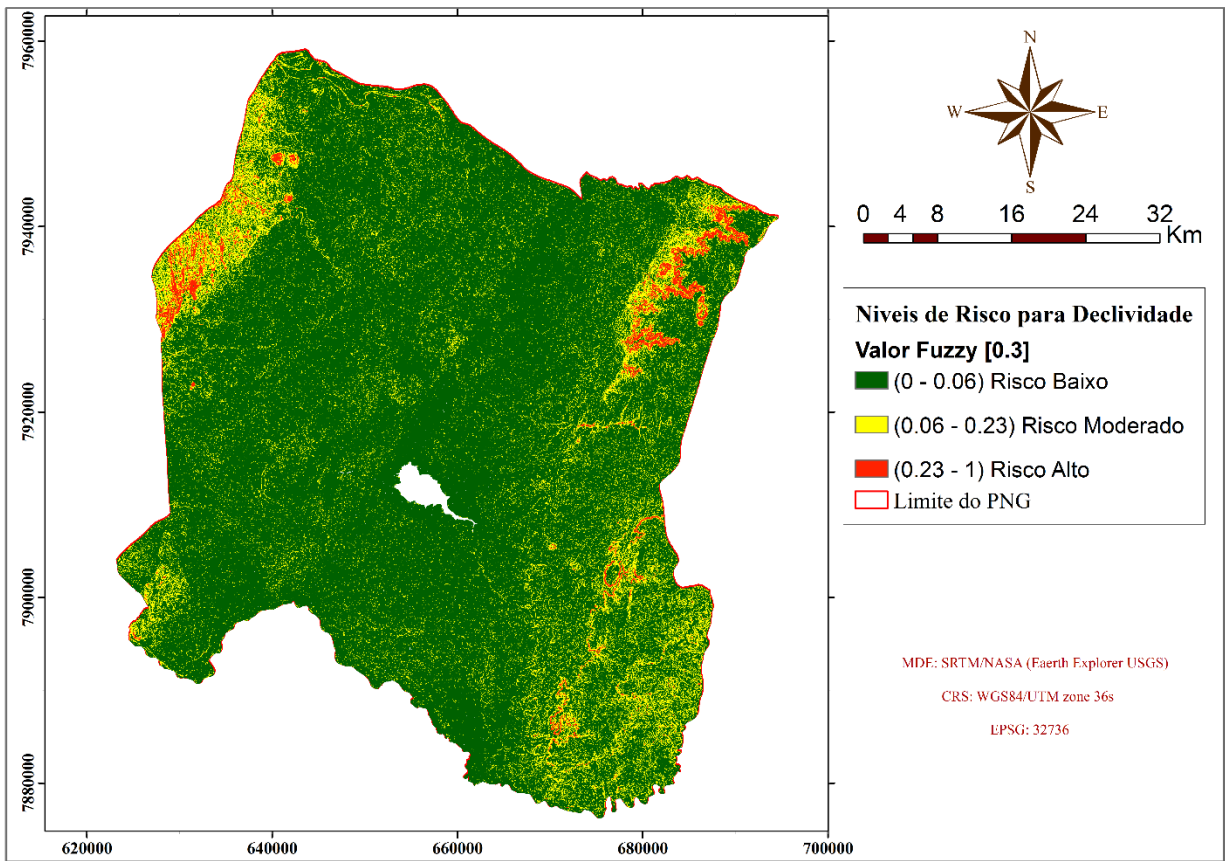


Figura 12: Efeito da Função Fuzzy Large na Declividade do Terreno do PNG

Fonte de dados: SRTM (Earth Explorer-USGS)

4.3. Orientação do Relevo

A orientação do relevo do PNG apresenta-se consoante a representação da figura 13, onde observa-se que as encostas (faces) de maior tamanho de área encontram-se predominantemente distribuídas ao longo de toda extremidade Leste e Noroeste. Há medida que se aproxima em direcção ao centro da zona de protecção (Vale do Rift), encontra-se predominantes as faces de menor tamanho de área. Na ordem de importância para o maior risco de ocorrência de incêndios, encontram-se as faces orientadas para o Norte (11.69 %) que correspondem a uma área de 233.03 Km², seguida das faces viradas para Oeste (13.08%) e Noroeste (12.05%) com 482.40 e 444.24 Km². As faces Nordeste (11.76%), Sudoeste (12.82%) e Leste (12.73%), ocupam cerca de 433.54, 472.80 e 469.41 Km² respectivamente; logo a seguir encontram-se disposta a face sudeste (12.62%) e o relevo plano (0.51%) com 465.48 e 18.73 Km² respectivamente; Por fim, as faces viradas para o

Sul (12.75%) representam as regiões do relevo com menor risco, e apresentam uma área de 470.25 Km². As faces viradas para o Oeste constituem a forma mais predominante e que apresenta maior área na região em estudo. (Tabela 5).

Tabela 5: Classes da Orientação do Relevo e suas respectivas áreas.

CLASSES	Orientação do Relevo (°)	Área (km ²)	Área (ha)	Área (%)
Relevo Plano	[-1 - -0.000001[	18.7307	1873.07	0.5
Faces Norte	] -0.000001 - 22.5[	216.6319	21663.19	5.9
Faces Nordeste	]22.5 - 67.5[	433.5441	43354.41	11.8
Faces Leste	]67.5 - 112.5[	469.4118	46941.18	12.7
Faces Sudeste	]112.5 - 157.5[	465.4754	46547.54	12.6
Faces Sul	]157.5 - 202.5[	470.2523	47025.23	12.8
Faces Sudoeste	]202.5 - 247.5[	472.7972	47279.72	12.8
Faces Oeste	]247.5 - 292.5[	482.4009	48240.09	13.1
Faces Noroeste	]292.5 - 337.5[	444.2414	44424.14	12.0
Faces Norte	]337 - 360]	214.2994	21429.94	5.8
TOTAL		3687.785	368778.51	100

Para Brow e Davis (1973) citados por Juvanhol (2014), a orientação do relevo tem influência sobre as condições de humidade e o tipo de material combustível, em função das condições de iluminação solar. No hemisfério Sul, os raios solares incidem mais diretamente sobre as faces voltadas para o Norte, transmitindo mais calor para essas faces do que para qualquer outra. Segundo os autores acima citados, as faces do Oeste são as segundas a receberem maior quantidade de energia, seguida da face Leste, e por fim, a face Sul é a que recebe menos quantidade de energia e conseqüentemente é a que menos aquece. Salientam ainda que “em altitudes maiores que 23°27’, a face Sul nunca recebe radiação solar directa, nem mesmo no verão, devido à inclinação do eixo da Terra em relação ao Sol”.

De acordo com Lorenzon et al., (2018), citado por Neder (2019), em dias que apresentam baixa humidade relativa do ar e menor quantidade de nuvens no céu, os raios solares chegam com maior intensidade à superfície terrestre, e conseqüentemente eleva-se a temperatura do ambiente, acelerando a perda de água do material combustível e aumentando o risco de ocorrência e propagação de incêndios.

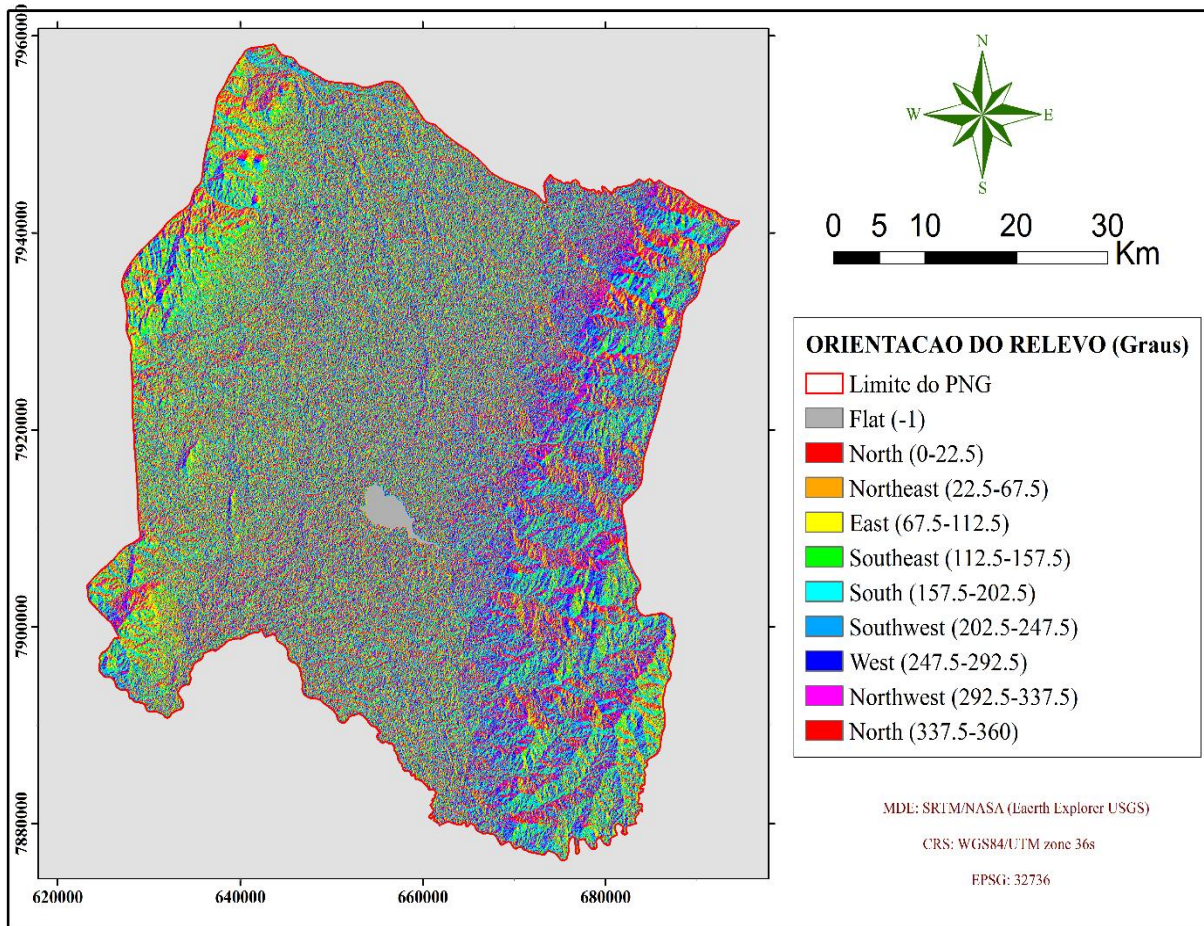


Figura 13: Mapa de Orientação do Relevo do PNG

Fonte de dados: SRTM (Earth Explorer-USGS)

4.3.1. Fuzzyficação da Variável Orientação do Relevo

Assemelhando-se aos estudos de Neder (2019) e Juvanhol (2014), a fuzzyficação da variável de orientação das encostas, mostra que dentro dos limites do PNG, o elevado risco de incêndios florestais está presente nas faces voltadas para o hemisfério Norte e Oeste. Este risco decresce a medida que as faces se voltam para Leste, Relevo plano e Sul respectivamente.

Para as faces que representam o maior risco, foram atribuídos graus de pertinência que variam de 0.56 a 1, por sua vez, estas faces estão grandemente destacadas ao longo de toda extremidade Leste e Oeste do parque. O risco moderado (0.19 a 0.56), também se encontra mais destacado nas regiões das extremidades Leste e Oeste, incluindo a região do lago Urema; e o risco baixo (0 a 0.19), distribui-se de forma pontual ao longo de toda extensão do parque (Figura 14).

As regiões de risco alto para a ocorrência e propagação de incêndios florestais, apresentam uma extensão de 2302.4 Km², correspondente a 70.7 % da área total. Por outro lado, cerca de 484.2 e

470.3 Km² (14.9 e14.4%) da área do PNG, apresentam respectivamente aos riscos moderado e Baixo.

De acordo com Haurwitz e Austin (1994), citado por Juvanhol (2014), apesar da quantidade de radiação solar que incide sobre as faces orientadas para o Leste, ser a mesma quantidade que incide sobre as faces voltadas para o Oeste, a temperatura da face Oeste torna-se mais elevada do que a da face Leste, pois durante o período de tarde, quando a radiação incide sobre a face Oeste, o terreno já se encontra pré-aquecido pelo ar cuja temperatura vem aumentando desde o nascer do sol. Em contrapartida, o aquecimento da face Leste inicia pela manhã com baixa eficiência causada pela perda de grande parte da radiação solar, durante a evaporação da água existente no terreno que se encontra húmido devido a redução de temperatura da noite anterior.

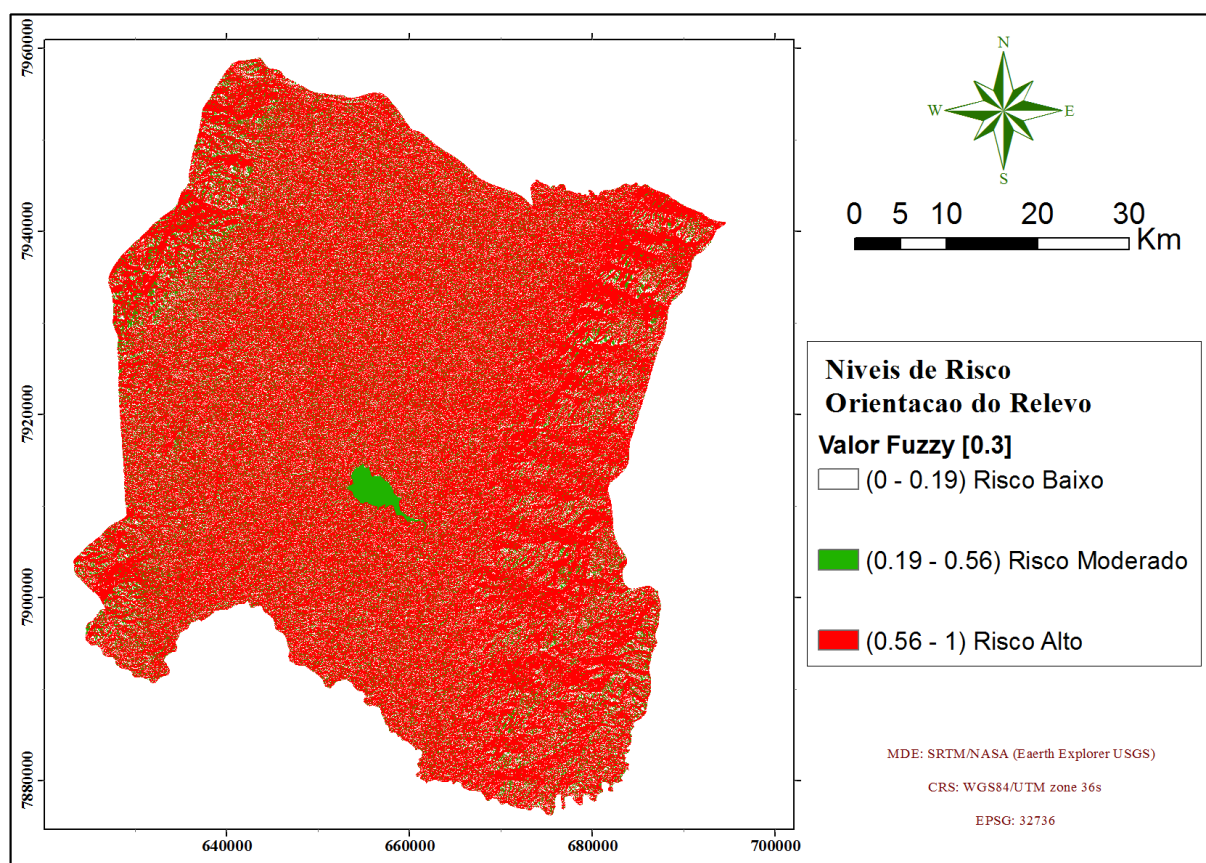


Figura 14: Efeito da Função Fuzzy Large na Orientação do Relevo do PNG

Fonte de dados: SRTM (Earth Explorer-USGS)

4.4. Proximidade às Estradas

Tabela 6: Área de influência pela rede viária do PNG

Categoria	Buffer (m)	Área (Km²)	Área (m²)	Área (ha)
Vias de Acesso	25	18.3	18298555	1829.86
Vias Secundárias	50	16.98	16983324	1698.33
Estrada Principal	100	22.78	22782381	2278.24
TOTAL		58.06	58064260	5806.43

A extensão de influência directa pela rede viária no interior do PNG, é de cerca de 58.06 Km² dividida em três (3) categorias (Estrada principal, Vias secundárias e Vias de acesso), dos quais, 22.78 Km² corresponde à Estrada principal, 16.98 Km² às Vias secundárias e 18.3 Km² às Vias de acesso (Tabela 6).

Assim como na Reserva Nacional do Niassa (Mathe, 2013), o risco de ocorrência de incêndios florestais no PNG, aumenta há medida que se a próxima às estradas, zonas habitacionais (residenciais) e zonas que refletem fortes influências das actividades humanas, definindo dessa forma, os padrões de distribuição espacial dos focos de ignição nas paisagens naturais. De acordo com Oliveira (2013), a proximidade às estradas principais, caminhos agrícolas e florestais constituem factores que interferem no perigo para a ocorrência de incêndios florestais, pois grandes números de incêndios são provocados pelo descuido do agente de ignição. Por outro lado, muita das vezes, os incêndios iniciam-se perto das vias de comunicação, confirmando assim a relação da proximidade a uma estrada com o aumento potencial do risco.

No interior da área de estudo, nota-se uma alta densidade de vias na zona sul, sendo que a maioria correspondem às vias usadas para a prática do turismo, o acesso à sede do parque e à base de treinamento dos fiscais do parque em estudo e também para outras áreas de conservação de Moçambique; na extremidade Oeste predominam Vias secundárias que ligam a estrada pública (Distrito de Gorongosa) à área de estudo; e na extremidade Leste, encontram-se vias que ligam a Vila de Muanza às zonas habitacionais situadas na zona tampão e no interior do parque, estendendo-se em direcção à Oeste e Noroeste do parque.

O cálculo de proximidade (distância euclidiana), mostra que as regiões que distam a um intervalo de 0 a 2159 metros das estradas (no PNG), são fortemente influenciadas e consequentemente apresentam um risco elevado, em comparação com as regiões que distam a um intervalo de 4777 a 7395, e 10667 a 16687 metros respectivamente (Figura 15).

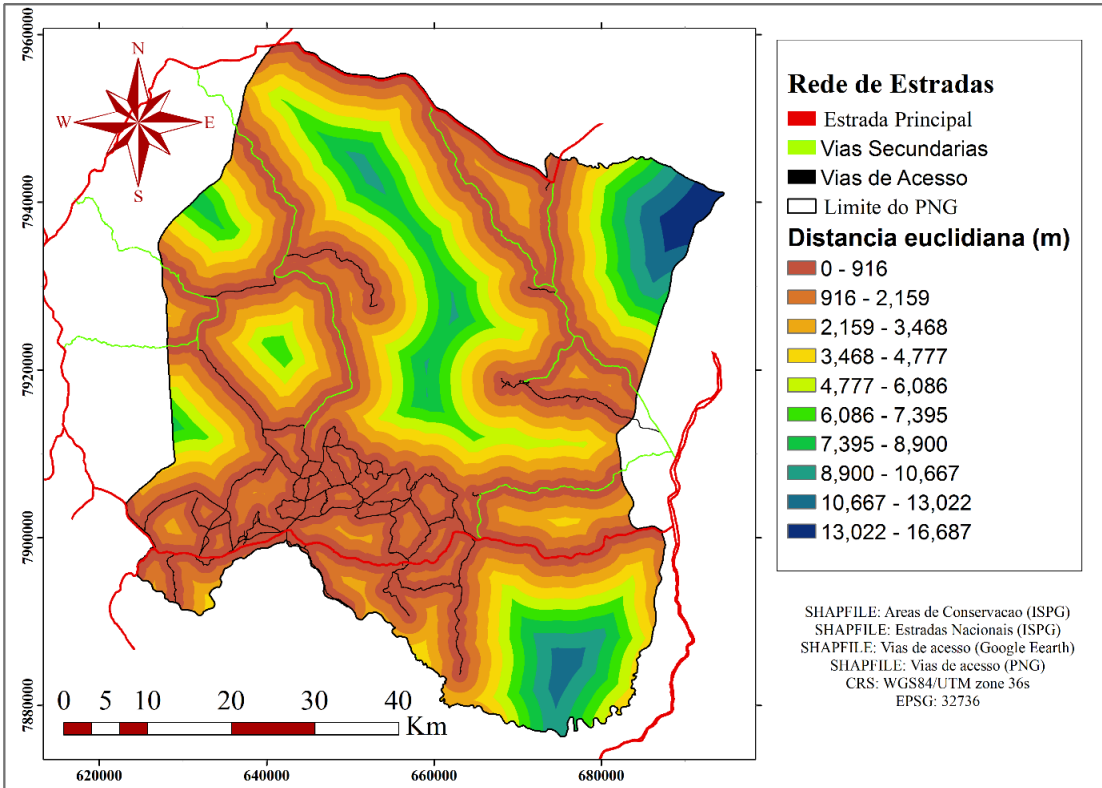


Figura 15: Mapa de Proximidade às Estradas (Distância euclidiana)

Fonte de dados: ISPG, PNG e Google Earth (2021)

4.4.1. Fuzzyficação da Variável Proximidade às Estradas

A fuzzyficação da proximidade às estradas pela função *FUZZY Small*, mostra que a sua influência representa um risco variável, sendo que o risco baixo (0 a 0.64) regista-se nas regiões Nordeste e Sudeste do PNG, assim como ao longo da região do interior (em direcção à serra da gorongosa). O risco alto (0.83 a 1) regista-se predominantemente na região Sul, Oeste e na extensão Nordeste. O risco moderado (0.64 a 0.83), encontra-se distribuído nas zonas que intermediam as regiões de alto risco e de baixo risco (Figura 16). As regiões de risco alto correspondem a 22% (812.7 Km²) de área total, as regiões de risco moderado correspondem a 37.6% (1385.1Km²) e por fim as regiões de risco baixo correspondem a 40.4% (1490.4 Km²) da área do parque.

A alta acessibilidade do homem às paisagens naturais do PNG, condiciona o aumento do risco de ocorrência de incêndios florestais visto que a maior parte dos focos que representam queimadas e incêndios, tem como causa as comunidades locais, seja de forma negligente ou mesmo acidental durante as suas actividades de subsistência.

Em estudos de riscos de incêndios florestais (Juvanhol, 2014; Mathe, 2013; Neder, 2019; Oliveira, 2017), a presença de vias de acesso nas florestas, é interpretada como sendo uma das condições-chaves que potencia a ocorrência de incêndios mediante ao acesso humano, porém, é importante referir que a rede viária, também pode apresenta-se como um dos elementos a ser considerado para a prevenção e combate a incêndios, pois podem servir de quebra-fogos e impedir a propagação para a outra margem; também permitem o rápido acesso de equipas e viaturas de combate durante a ocorrência.

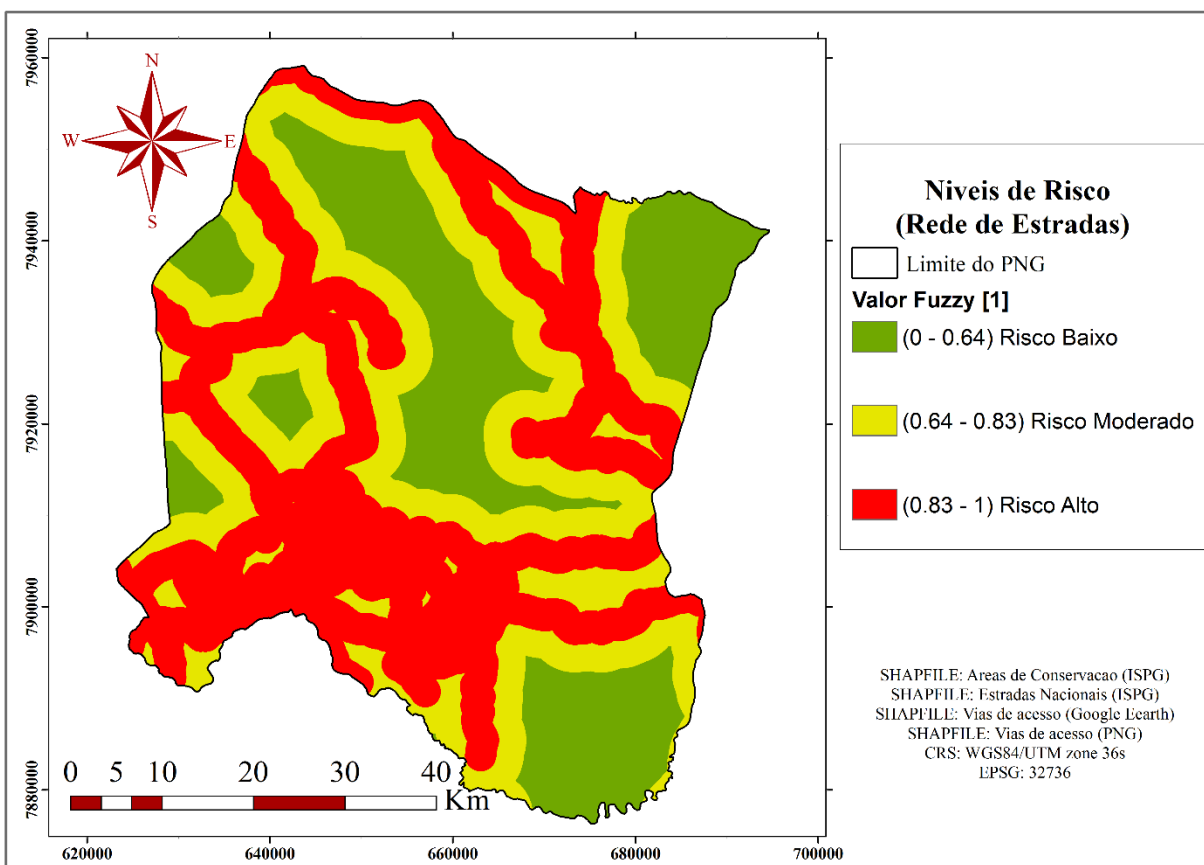


Figura 16: Efeito da Função Fuzzy Small na Proximidade às Estradas do PNG

Fonte de dados: ISPG, PNG e Google Earth (2021)

4.5. Proximidade às Zonas Habitacionais

Em todo o mundo, o homem é apontado como o principal causador dos incêndios florestais (Mbanze, 2013), e assemelhando-se às estradas, as zonas habitacionais do PNG exercem uma grande influência sobre as condições naturais das paisagens, pois estas zonas correspondem às áreas de forte domínio da população. Durante o mapeamento (com Google Earth Pro), foram

encontradas onze (11) zonas habitacionais na área de estudo, das quais, a sua maior concentração regista-se ao longo das extremidades Norte, Este e Sudoeste (Tabela 7 e Figura 17).

Tabela 7: Áreas de influência directa das Zonas Habitacionais do PNG

Zonas Habitacionais	Perímetro (m)	Área (km ²)	Área (ha)
Baruco	31046	12.77	1276.72
Bute	11243	4.22	422.186
Chamissanga	37515	50.61	5060.64
Chipondaminga	21928	5.42	541.986
Chitengo/Mtindiri	24443	11.38	1138.34
Cusinurera	40984	59.40	5940.25
Goinha	9582	7.09	708.589
Muananimai	15520	8.56	856.265
Nhagutua	5397	1.58	158.197
Nhumba-Zaioa	9169	3.20	319.511
Sua-Zamambo	21486	8.73	872.633
TOTAL	228313	172.95	17295.3

Estas zonas apresentam um perímetro total de 228.313 Km que circunda a área de 172.9532 Km². Dentre essas zonas, destacam-se as zonas de Cusinurera e Chamissanga que apresentam cerca de 59.40 e 50.61 Km² de área respectivamente; de seguida, destaca-se a zona de Baruco com 12.77 Km² e Chitengo/Mtindiri com 11.38 Km². A zona habitacional mais pequena da área em apreciação, é a chamada Zona de Nhagutua com cerca de 1.58 Km².

Em geral existem dúvidas sobre a quantidade exata de aldeias existentes no PNG, pois para Cordeiro (2015), as informações oficiais sobre as comunidades que vivem dentro do parque são escassas e insatisfatórias.

“[...] sem que, até à data, tenha encontrado mais informação sobre esta matéria, aproveitei a minha estadia no parque para questionar o Dr. Marc Stalmans (atual diretor dos serviços científicos do parque) sobre a quantidade de aldeias localizadas dentro do parque, assim como, sobre o ponto de situação dessa campanha de “deslocação das comunidades”. Referiu-me que, embora não fosse matéria da sua responsabilidade, tinha conhecimento de que as aldeias dentro do parque seriam três, Goinha, Goronga e Mueredze. Esta última, com cerca de setenta famílias, é a única que tem o processo de

deslocação em curso, contudo iniciado há cerca de sete anos, evidenciando dificuldades óbvias de uma acção deste tipo. Uma dúvida resulta dos dados indicados pelo PNG, que apontam para a existência de apenas estas três comunidades dentro do parque, pois Goronga parece ser uma comunidade maior, sobretudo se considerarmos toda a sua extensão para norte do parque...” (Cordeiro, 2015).

O cálculo de proximidade às zonas habitacionais (distância euclidiana), mostra que as regiões mais próximas a essas zonas sofrem maior influência das comunidades, e há medida que a distância aumenta, o nível de influência diminui. As regiões que distam a um intervalo de 11,622 a 28,496 metros apresentam menor influência atópica em relação às regiões que distam a um intervalo de 0 a 11,622 metros; dessa forma, essas regiões em particular têm uma alta probabilidade de iniciarem um determinado incêndio florestal (Figura 17).

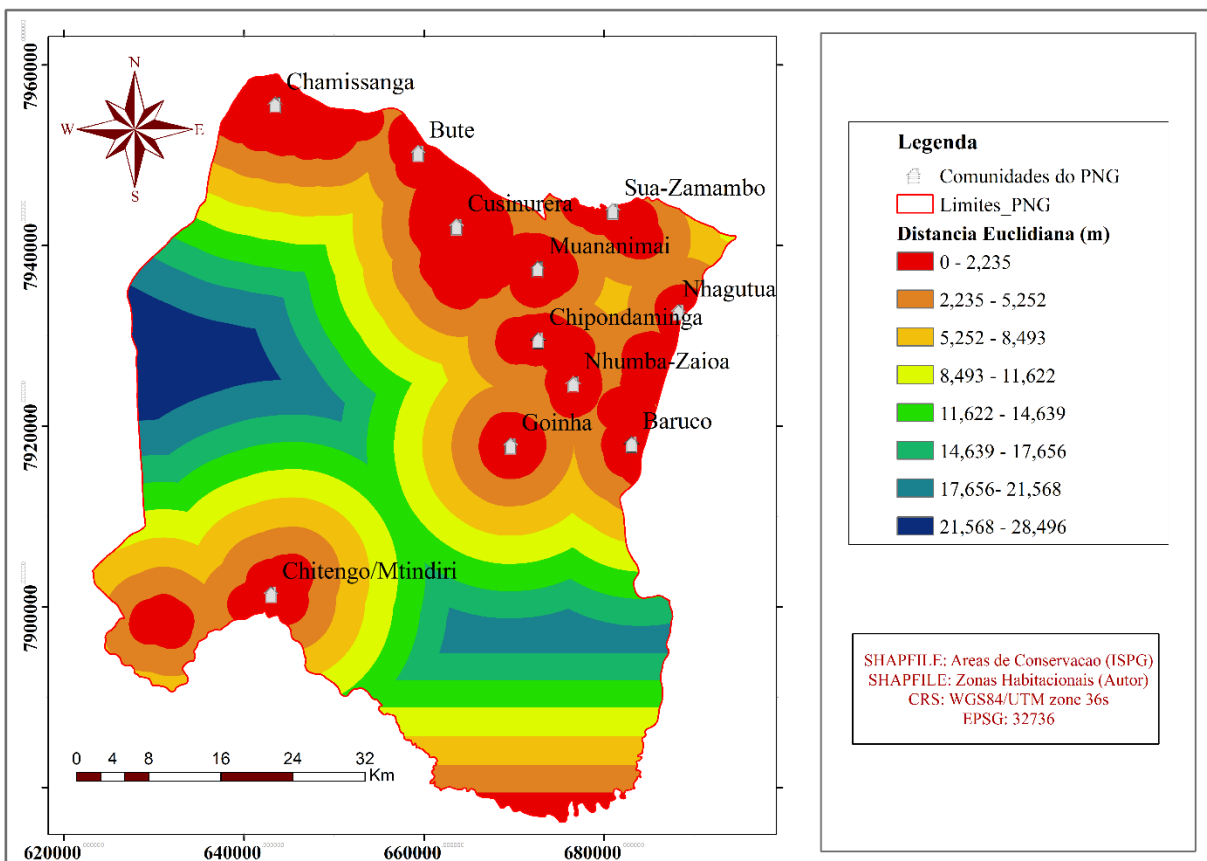


Figura 17: Mapa de Proximidade às Zonas Habitacionais (distância euclidiana)

Fonte de dados: ISPG e Google Earth (2021)

4.5.1. Fuzzyficação da Variável Proximidade às Zonas Habitacionais

A modelagem da proximidade às zonas habitacionais pela função *FUZZY Small*, revela que o PNG apresenta regiões com risco, variando de baixo a alto. Para os locais com risco alto (1069.2 Km²), foram atribuídos graus de pertinência que variam de 0.80 a 1, os locais com risco moderado (1116.6 Km²), foram atribuídos valores que representam os graus de pertinências centrais que variam entre 0.58 a 0.80. As zonas classificadas com risco baixo (379.7 Km²), foram atribuídos valores entre 0 e 0.58. O risco de ocorrência de incêndios agrava-se ao longo de toda extensão Norte e nos hemisférios Sudoeste e Sudeste (Figura 18). As regiões de alto, moderado e baixo riscos, correspondem a 29.0, 30.3 e 40.7 % da área do parque respectivamente.

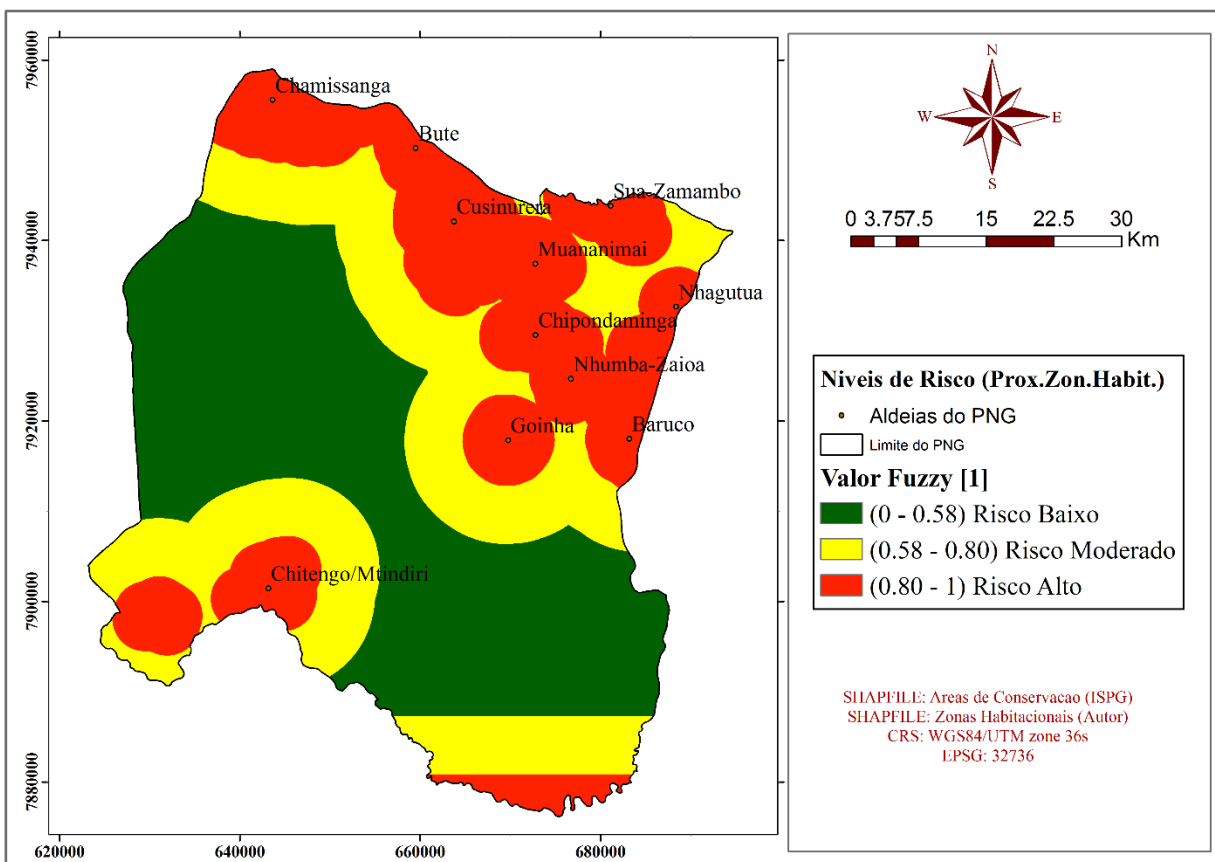


Figura 18: Efeito da Função Fuzzy Small na Proximidade às Zonas Habitacionais do PNG

Fonte de dados: ISPG e Google Earth (2021)

Em concordância com Jequecine (2017) e Cordeiro (2015), as comunidades locais apresentam condições de vida consideradas precárias e para a sua subsistência dependem fortemente dos recursos naturais da região, assim como de algumas actividades a escala tradicional como: a agricultura, criação de gado caprino e produção de mel.

Tendo a agricultura como a actividade principal de subsistência (desenvolvida usando técnicas tradicionais e uso do fogo), as famílias têm exercido muita pressão sobre as florestas, não só pelo facto de estenderem cada vez mais as suas “machambas” e residências, mas sim pelo uso descontrolado e recorrente do fogo principalmente para a sua limpeza antes e depois da colheita.

“[...]O fogo destrói anualmente extensas áreas na zona tampão sob pretexto de preparar os campos de cultivo e caçar pequenas espécies. Considerando a queima descontrolada, o fogo se alastra em progressão para o mesmo parque causando a destruição da biomassa, principal fonte de alimento para herbívoros. Além disso, a destruição da vegetação deixa o solo descoberto e à mercê de agentes geodinâmicos externos da terra, situação que contribui significativamente para a ocorrência de processos de erosão e empobrecimento dos solos...” (Jequecene, 2017).

Outras actividades básicas de uso do fogo pelas comunidades, compreendem a renovação de pastagens, caça de pequenos mamíferos (ratazanas e coelhos), e a colecta de mel em colmeias tradicionais feitas na base das cascas das árvores.

4.6. Defuzzyficação das Variáveis

A combinação dos riscos das variáveis anteriormente analisadas (operador *FUZZY OVARLAY GAMA*), deu origem ao mapa do Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais no PNG (figura 19). Os menores valores de risco (0 a 0.18) estão associados a regiões predominadas pelas águas e vegetação densa. Devido a sua composição (presença de cursos de água, espécies florestais em estágios médios e avançados de desenvolvimento, e fraca presença antrópica) e disposição (locais de difícil acesso), estas áreas exercem uma influência negativa natural que dificulta a ocorrência de eventos de incêndios.

Os valores de médio risco apresentam uma pertinência à ocorrência de incêndios de 0.18 a 0.37 no PNG, correspondendo às regiões maioritariamente predominadas pela vegetação esparsa ou savanas, e com baixo a médios índices de influência das comunidades locais, durante a prática de actividades que envolvem o fogo.

A alta pertinência (0.37 a 1) para a ocorrência de incêndios associa-se às regiões cuja influência antrópica é notória e consideravelmente elevada. Nestas regiões, verificam-se acções frequentes envolvendo o fogo (queimas para a renovação de pasto e limpezas de áreas para a prática da agricultura) e por sua vez correspondem a áreas onde as comunidades locais estão sediadas (zona norte do PNG, incluindo a zona tampão). Em algumas regiões da zona sul da área de estudo,

apresentam igualmente a alta pertinência para a ocorrência de incêndios, tendo como influência a elevada densidade e proximidade às estradas, assim como a presença humana e suas ações.

Constatações semelhantes foram feitas por Mathe (2013) na Reserva Nacional do Niassa, em que as classes de risco muito baixo e baixo correspondem a áreas de florestas sempre verdes e onde a actividade humana é praticamente ausente. Para as classes de risco alto e muito alto, estiveram fortemente associadas às regiões onde verificam-se intensas actividades humanas que incluíam a caça e agricultura de subsistência, assim como a colecta de mel.

As regiões classificadas como sendo de risco baixo, ocupam uma área de 1299.80 km², correspondendo cerca de 35.7 % da área total do PNG. Os locais que apresentam o risco moderado, correspondem às regiões com maior quantidade de área e detêm cerca de 1670.51 km², o equivalente a 45.8 %. As regiões de risco alto apresentam uma área relativamente pequena, com cerca de 673.67 km², que equivale a 18.5 % da área total (Tabela 8).

Tabela 8: Quantidade de Área em função do Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais no PNG

Níveis de Risco	Pertinência	Área (m ²)	Área (Km ²)	Área (%)
Risco Baixo	0 a 0.18	1299757700	1299.80	35.7
Risco Moderado	0.18 a 0.37	1670509600	1670.51	45.8
Risco Alto	0.37 a 1	673669800	673.67	18.5

O alto risco (0.37 a 1), apresenta-se na região Noroeste do PNG, e predomina em direcção Este-Norte e Sul-Norte. Importa referir que, embora as áreas que apresentam o risco alto sejam reduzidas quando comparadas às áreas de outras categorias de risco, deve-se desenvolver e ou melhorar estratégias que possam permitir uma boa prevenção, controlo e combate de qualquer actividade indesejada do fogo, pois uma vez iniciado um incêndio, pode alastrar-se de maneira imprevisível devastando grandes coberturas florestais, causando degradação do ecossistema e consequente perda da biodiversidade (Figura 19).

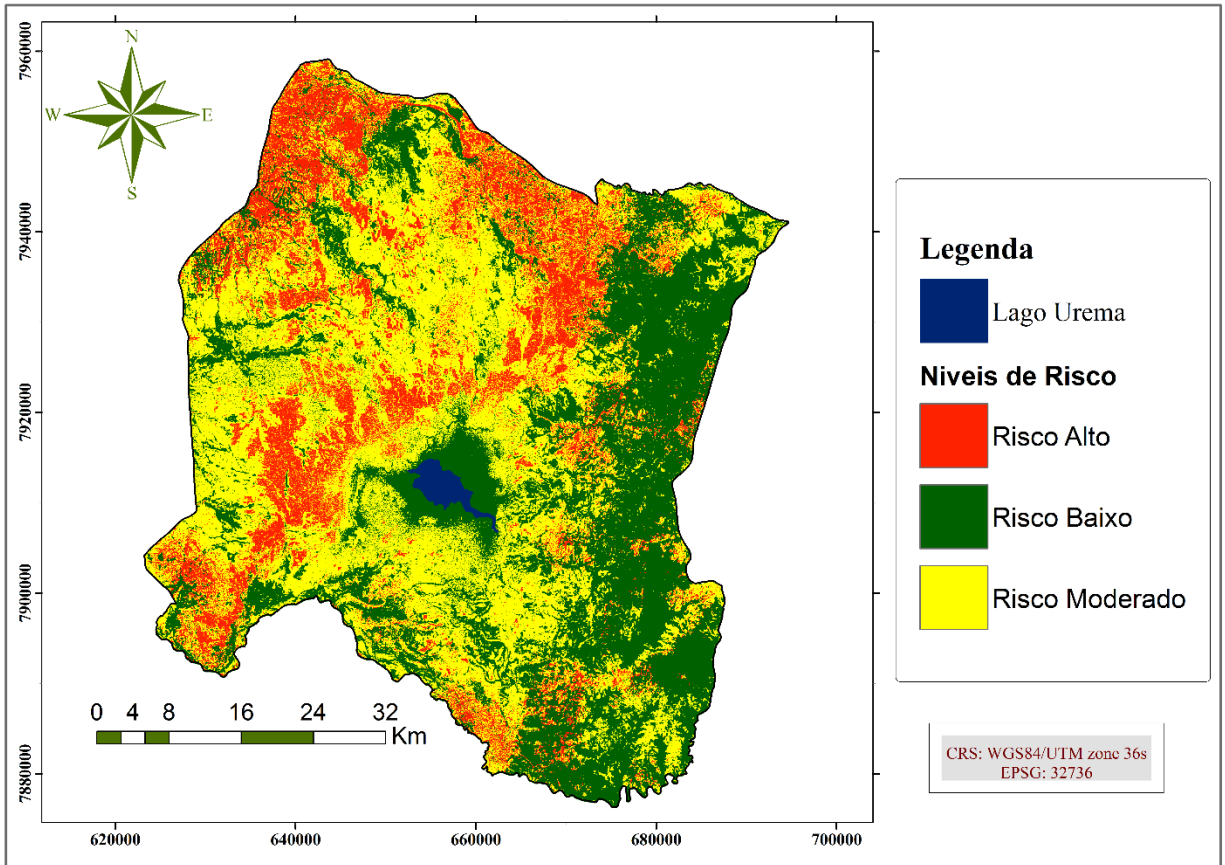


Figura 19: Mapa de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais no PNG

Os níveis de influência das variáveis estudadas, mostram que a variável que mais contribui para o alto risco no mapa ROIF é a Orientação do relevo com um peso de 42.4 %, devido ao facto de a maioria das encostas estarem voltadas para o norte, condicionando maior exposição solar do material combustível e secagem progressiva, elevando o risco de ocorrência e propagação de incêndios (Juvanhol, 2014). Para as outras variáveis, o nível de influência varia de 1.1 a 15 % para o alto risco (Tabela 9).

Tabela 9: Níveis de Influência das Variáveis de Entrada ao Alto Risco no Mapa ROIF

Variáveis	Nível de risco	Área (Km ²)	Niel de Influência (%)
Uso e Ocupação da Terra	Risco Alto	552.4	10.2
Declividade do Terreno	Risco Alto	61.4	1.1
Orientação do Relevo	Risco Alto	2302.4	42.4
Proximidade às Estradas	Risco Alto	812.7	15.0
Proximi. às Zonas Habitacionais	Risco Alto	1069.2	19.7
Densidade de Focos de calor	Risco Alto	628.5	11.6
TOTAL		5426.6	100.0

4.6.1. Validação do Mapa de Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais do PNG

No PNG, foi registado um total de 1869 focos de fogo desde 01 de Janeiro a 06 de Outubro de 2022, distribuídos por toda extensão. Estes focos de fogo, encontram-se maioritariamente concentrados nas regiões de forte domínio das comunidades locais, sendo elas as zonas próximas às habitações, vias de acesso, zonas de prática da agricultura e pastagens. Nas regiões predominadas pela floresta densa, a elevada concentração de focos regista-se de forma pontual, em locais de actividades de colecta de mel e nas regiões próximas da zona tampão.

De acordo com Jequecenc (2017), na maior parte das vezes o fogo que ocorre dentro do parque tem como início na zona tampão, sendo que este se alastra para o interior causando consideráveis danos ecológicos (perda da biodiversidade, empobrecimento de solos e seca dos cursos de água). Apesar de afirmação acima explicar a razão da elevada densidade de focos na zona limitante do parque, deve-se também considerar o facto de que as poucas pessoas que habitam no interior, são igualmente responsáveis pelo início de muitos incêndios, pois assim como as comunidades da zona tampão, também dispõem das mesmas condições de vida e dos mesmos hábitos tradicionais de uso do fogo durante as actividades de agricultura, renovação de pastagens, caça de pequenos mamíferos e a prática de produção e colecta de mel em colmeias à base das cascas de árvores.

Do número total de focos (1869) ocorridos no PNG, cerca de 693 focos registaram-se em regiões classificadas como sendo de risco alto, correspondendo a 37 % do total de ocorrências. As regiões classificadas como de risco moderado e baixo, registaram cerca de 821 e 355 focos, o equivalente a 44 e 19 % respectivamente.

Tabela 10: Relação das classes de risco do Mapa ROIF com a ocorrência de incêndios no PNG

Risco	Nº de Focos	Área (Km²)	Densidade [n/km²]
Risco Baixo	355	1299.8	0.27
Risco Moderado	821	1670.51	0.49
Risco Alto	693	673.67	1.03

Analisando a tabela acima, nota-se que a classe de risco moderado apresenta maior número de ocorrências de focos, em comparação com as classes de risco alto e baixo; por tanto, mesmo detendo maior número de ocorrências, a classe de risco moderado apresenta também uma área relativamente grande (1670.51 km²) que acaba reduzindo a densidade (pressão) dos focos e consequente redução do risco em relação à classe de risco alto que por sua vez apresenta uma quantidade de área pequena (673.67 Km²) e uma elevada densidade de focos ocorridos. Olhando

para a densidade de ocorrências por Km², percebe-se que as regiões classificadas como sendo de risco alto, recebem muita pressão de ocorrências de incêndios e queimadas do que qualquer outra região no PNG. Estas regiões apresentam uma densidade de 1 focos/km², seguidas das regiões de risco moderado e baixo, apresentam densidades de 0.5 e 0.3 focos/Km² respectivamente.

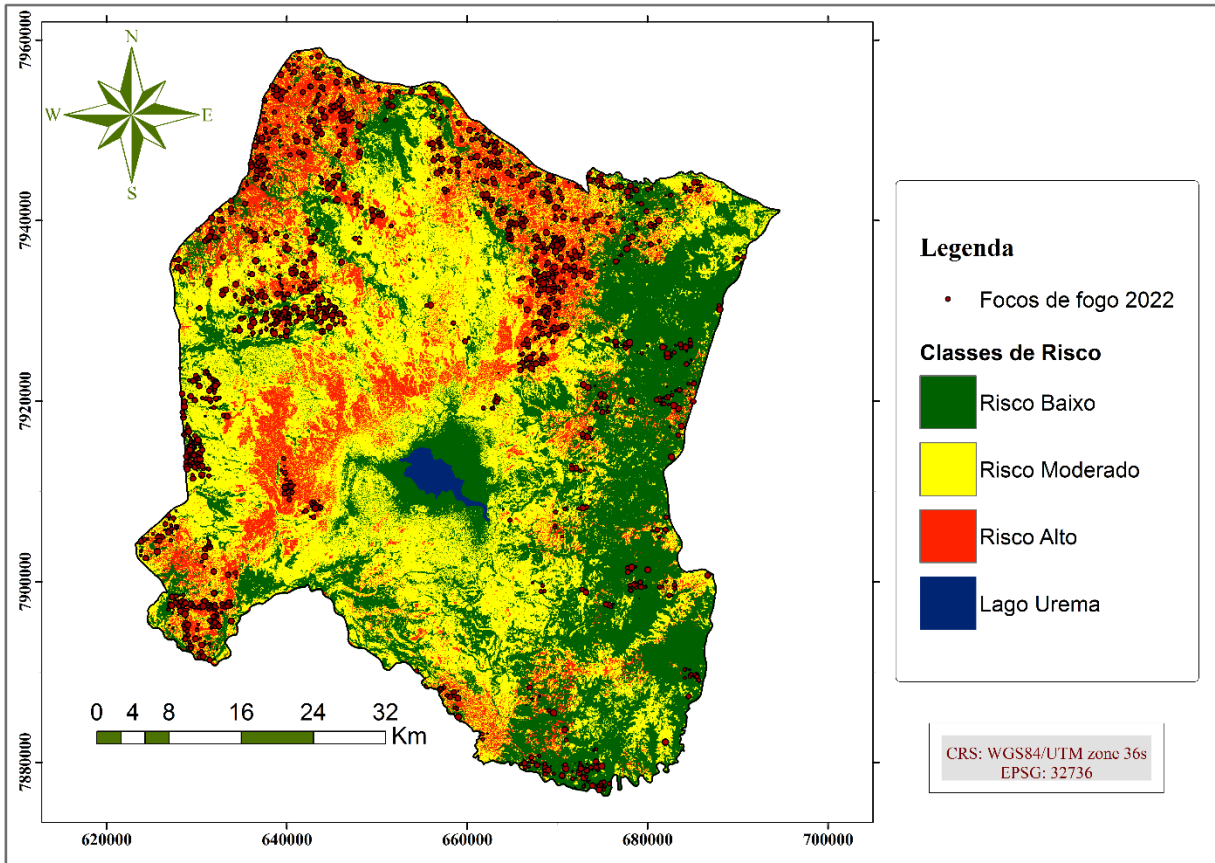


Figura 20: Sobreposição dos focos de fogo ocorridos de 01/01/2022 a 06/10/2022 ao mapa de risco no Parque Nacional da Gorongosa

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos durante a realização do presente estudo, conclui-se que:

- As regiões de potencial risco de ocorrência de incêndios florestais (risco alto) apresentam uma área de 673.7 km², o equivalente a 18.5 % do total de área do PNG.
- As classes de Uso e Ocupação da Terra influenciam cerca de 552.4 Km², o equivalente a 10.2 % para o maior risco de ocorrência de incêndios. As áreas ocupadas pela floresta esparsa/savanas, zonas de pastagens/inundações, agricultura, assim como as zonas próximas às habitações, são as que apresentam maior risco.
- A alta pertinência ao risco de ocorrência de incêndios na área de estudo, é fortemente associada às regiões cuja influência antrópica é elevada (proximidade às zonas habitadas), essas regiões apresentam 1069.2 Km² e o seu nível de influência é de 19.7%.
- As regiões que se encontram a um intervalo de 0 a 2159.5 metros de distância em relação às estradas, são fortemente influenciadas, contribuindo com 15 % de nível de influência para o alto risco de ocorrência dos eventos de incêndios.
- A orientação do relevo apresenta 2302.4 Km² de alto risco, com uma influência de 42.4 % para a ocorrência de incêndios no PNG.
- A declividade influencia cerca de 61.4 Km², o equivalente a 1.1% para o risco alto de ocorrência de incêndios no PNG.

6. RECOMENDAÇÕES

Aos Gestores do Parque Nacional da Gorongosa

Melhoramento das actividades de monitoria e planeamento de ações que visam prevenir, controlar e combater de imediato os incêndios florestais (estabelecimento estratégico de postos de vigia em locais de potencial risco de ocorrência de incêndios, assim como as equipas especializadas no combate dos incêndios);

Intensificar as actividades de monitoria e prevenção de incêndios/queimadas nos meses de elevadas frequências e actividade do fogo (Julho a Novembro), por meio da mobilização contínua de equipas e equipamentos de combate, assim como aplicação da queima prescrita em zonas de forte domínio humano.

Intensificação das actividades de consciencialização e educação das comunidades locais sobre as formas correctas de uso do fogo, bem como dos perigos que podem advir do uso descontrolado;

Envolverem cada vez mais as comunidades nas actividades de co-gestão do parque.

Aos investigadores

Desenvolvimento do estudo envolvendo mais variáveis que influenciam no elevado risco de ocorrência de incêndios, tais como temperatura, circulação dos ventos e distribuição da fauna, de modo a ter resultados mais fiáveis.

Desenvolver estudos de simulação do comportamento do fogo e previsão das possíveis direcções a serem tomadas pelos incêndios florestais durante a sua propagação e em diferentes pontos de início no PNG.

Desenvolver estudos de identificação de melhores rotas viárias para a mobilização de equipas e equipamentos de combate à incêndios florestais nos pontos mais críticos do PNG.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AMADE, N. (2014), *Análise Comparativa dos Classificadores Parâmetros usando Imagem Ikonos 2 na Floresta de Inhamacari – Machipanda*. Maputo: UEM.
- ARONE, E. A. N. (2002), *Análise Temporal e Espacial das Queimadas em Moçambique*. Maputo: UEM.
- BATISTA, A. C. (1995). *Avaliação da queima controlada em povoamentos de Pinus taeda no Norte do Paraná*. Curitiba: UFPR.
- BATISTA, A. C. (1990). *Incêndios florestais*. Recife: UFRPE.
- BEUTLING, A. (2009). *Modelagem do Comportamento do Fogo com base em Experimentos laboratoriais e de campo*. Curitiba: UFPR.
- Biazatti, L. D. et al., 2020. *Influência do Uso e Ocupação da Terra no Risco de Ocorrência de Incêndios Florestais*. ACSA, Volume 16, pp. 155-160.
- BR, (2016). *Aprovação do Plano de Maneio do Parque Nacional da Gorongosa para o Período de 2016 a 2020*. Série-I. N°88. Maputo: MITADER.
- CENACARTA, (2020). *Uso e Cobertura da Terra*. Disponível em: <www.cenacarta.com> Acesso em 2020.
- CORDEIRO, P. J. M. d. L. (2015). *Projeto de recuperação e conservação do Parque Nacional da Gorongosa: Paisagem Natural versus Cultural – análise crítica do território*. Lisboa: ISCTE-IUL.
- DGEDGE, G. S. et al. (2016). *Reflexões sobre a Geografia Física e o Ambiente num Mundo em Conflito: Encontro Luso-Afro-Americano de Geografia Física e Ambiente*. ed, Editora educar. Moçambique: UP, CEGOT, UM.
- FERREIRA, P. F. M. & JUSTI, R. S. (2008). *Modelagem e o “Fazer Ciência”*.
- FRANCISCO, F. D. (2016). *Avaliação da Diversidade da Herpetofauna no Parque Nacional da Gorongosa*. Maputo: UEM.
- GAYLOR, H. P. (1974). *Wildfires: prevention and control*. Bowie: Prentice-Hall.
- G. M. (2018). *Turismo Baseado na Natureza nas Áreas de Conservação*. Maputo.
- JEQUECENE, D. B., SÁNCHEZ, M. Y. R. & SILVA, R. F. d. (2017). *Impacto de la Educación Ambiental en las Comunidades Próximas del Parque Nacional de Gorongosa - Estudio de Caso Comunidad de Nhambita*. Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental, Volume 34, pp. 147-165.

- JUVANHOL, R. S. (2014). *Modelagem da Vulnerabilidade à Ocorrência e Propagação de Incêndios Florestais*. Jerônimo Monteiro-ES: UFSP.
- LEONARDO, B. et al. (2011). *Análise da Precipitação e sua Influência na Ocorrência de Incêndios florestais no Parque Nacional Serra de Itabaiana*. Sergipe.
- MATHE, M. F. (2013). *Modelação SIG na avaliação do risco de incêndio na Reserva Nacional do Niassa*, Lisboa: ISEGI-UNL.
- MBANZE, A. A. (2013). *Análise das Ocorrências de Incêndios em Povoamentos Florestais da Empresa Chikweti Forest of Niassa no Norte de Moçambique*, Curitiba: UFP.
- MENEGUELLI, F. (2018). *Análise das Ocorrências de Incêndios Florestais no Parque Estadual de Itaúnas Conceição da Barra, ES*. Espírito Santo: UFES.
- METEOBLUE, (2022). *Arquivo Meteorológico mundial*. [UB]. Disponível em: <<https://www.meteoblue.com/pt/tempo/historyclimate/weatherarchive>>. Acessado em 2022.
- MICOA, (2007). *Programa de Acção Nacional para a Adaptação Às Mudanças Climáticas (NAPA)*. Maputo: DNGA.
- MOTTA, D. S. (2008). *Identificação dos Fatores que Influenciam no Comportamento do Fogo em Incêndios Florestais*. Seropédica- RJ: UFRRJ.
- NASA. (2020). *Shuttle Radar Topography Mission*. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/index.html>>. Acessado em: 2020.
- NASA. (2020). *National Aeronautics and Space Administration [US]*. Disponível em: <<https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/c6-mcd14dl>>. Acessado em: 2020.
- NEDER, E. C. (2019). *Aplicação da Modelagem Fuzzy para Avaliação de Risco de Incêndios Florestais na Reserva Biológica do Córrego Grande e sua Zona de amortecimento*. Jerônimo Monteiro-ES: UFES.
- NUNES, J. (2005). *Um novo índice de perigo de incêndios florestais para o estado do Paraná-Brasil*. Curitiba: UFPR.
- OLIVEIRA, D.S. (2002). *Zoneamento de Risco de Incêndios em Povoamentos Florestais no norte de Santa Catarina*, Curitiba: UFPR.
- OLIVEIRA, A. L. S. d. et al., (2017). *Comparação e Validação da Modelagem Espacial de Riscos de incêndios Considerando Diferentes Métodos de Predição*. Bulletin of Geodetic Sciences, Out.- Dez., Volume 4, pp. 556 - 577.

- OLIVEIRA, A. L. S. d., (2013). *Modelagem Espacial de Predição de Riscos de Incêndios com Lógica Fuzzy, Comparação e Validação*. Dissertação de Mestrado. Recife: UFP.
- PEDROSA, B.M. & CÂMARA, G. (2003). *Modelagem Dinâmica: Conceitos Básicos e Exemplos de Sistemas*.
- P. N. G. (2014). *Clube Empresarial da Gorongosa*. Sofala: PNG.
- RIGNEL, D. G. S. et al. (2011). *Uma Introdução a Lógica Fuzzy*: Revista Eletronica de Sistemas de informação e Gestão Tecnológica: Uni-FACEF.
- SOARES, R. V. & BATISTA, A. C. (2007). *Incendios Florestais: Contrle, efeitos e uso do fogo*. Curitiba: FUPEF.
- SILVA, F. N. (2015). *Modelagem Fuzzy aplicada a Políticas Públicas: Proposta de um Índice Municipal de Qualidade Ambiental*. Sorocaba: unesp-JMF.
- SILVA, L. M. (2013). *Modelagem Fuzzy Como Subsídios Para a Especialização da Vulnerabilidade Costeira à Erosão*. Recife: UFP.
- SOARES, R.V. (2003). *Novas tendências no controle de incêndios florestais*.
- SOARES, R. V. (1985). *Incêndios florestais: controle e uso do fogo*. Curitiba: FUPEF.
- SOUSA, C. et al. (2000). *Relatório do Projeto de Cartografia de Risco de Incêndio Florestal - CRIF 2ª Fase*.
- STALMANS, M., PEEL, M. & GONÇALVES, D. (2018). *Aerial wildlife count of the Parque Nacional da Gorongosa*. Moçambique: PNG.
- TARNE, J. & MORTENSON, C. (2009). *Fire Management: Technical Assistance Mission to Gorongosa National Park*. Mozambique: USDA Forest Service.
- TORRES, F.T.P et al. (2016). *Perfil dos Incêndios Florestais em Unidades de Conservação Brasileiras no Período de 2008 a 2012*. In: Revista Floresta, Curitiba, v.46, p.531-542.
- WWF, (2017). *Construímos o Futuro das Áreas de Conservação: Conservação em Números*. Suíça: WWF.

ANEXOS

Anexo I: Evidência da ocorrência de incêndios no PNG



Figura 21: Ocorrência e propagação do fogo não planejado (A e C); Emissões de gases tóxicos (B)



Figura 22: Áreas devastadas pelo Fogo não controlado (D, E e F).

Anexo II: Área de proteção total do PNG



Figura 23: Santuário do PNG (A), Áreas de pastagem (B e C)

Anexo III: Evidência da existência de comunidades e sua relação com incêndios no PNG

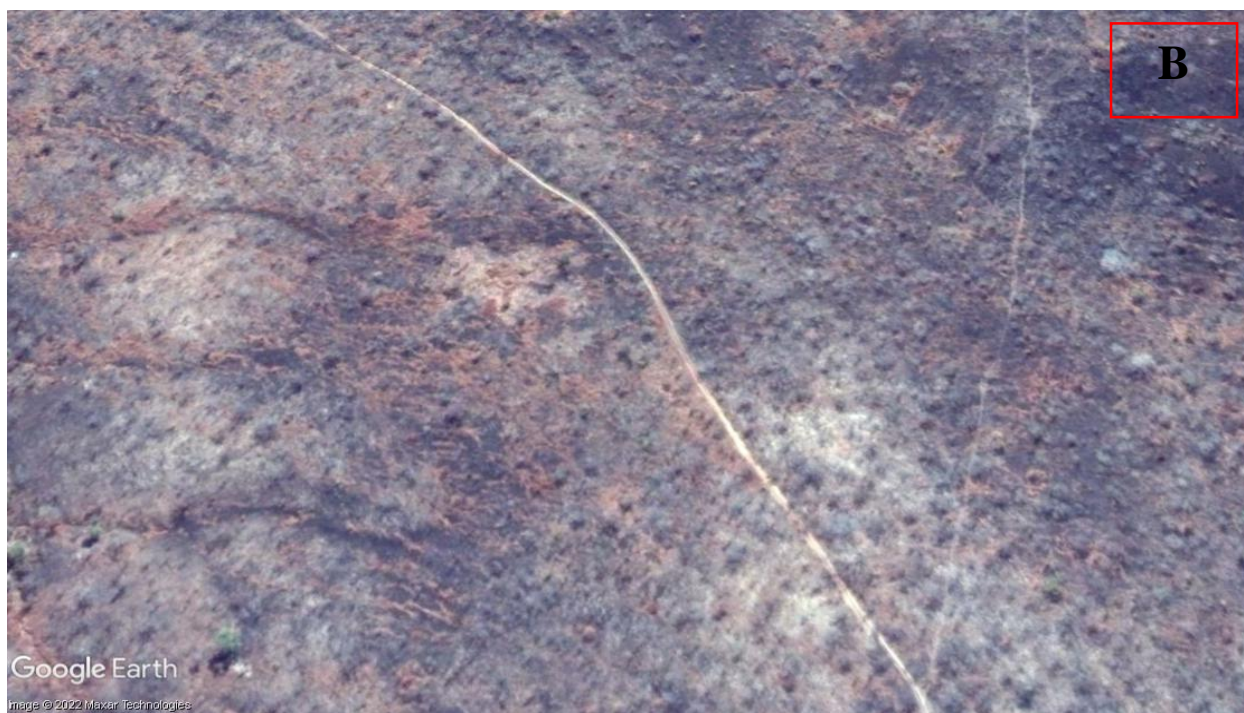


Figura 24: Foto aérea da comunidade de Chipondaminga (A) e vestígios da ocorrência de fogo ao longo da via de acesso (B).

Fonte: Google Earth, 2021.

Anexo IV: Inquérito para a aquisição de informações adicionais no campo

Distrito/Localidade _____; Nr. Questionário _____; Data ___/___/___
Nome da Comunidade _____; Coordenadas X: _____/Y: _____

1. Quais são as actividades de subsistência que a comunidade pratica?

2. Como são feitas essas actividades?

3. Que instrumentos usam para exercer essas actividades?

4. Tem usado o fogo durante essas actividades?

Sim () Não ()

5. Quais são as actividades que envolvem o fogo?

6. Têm ocorrido queimadas ou Incêndios nessa comunidade?

Sim () Não ()

7. Em que época tem ocorrido eventos de queimadas e incêndios?

8. Tem desenvolvido actividades que visam controlar e combater as queimadas e Incêndios?

Sim () Não ()

9. Quais são essas actividades realizadas para o combate e controlo dos Incêndios?

10. Tem tido ajuda para o combate de incêndios/ queimadas?

Sim () Não ()

11. De quem tem tido a ajuda?

12. Que técnicas de combate de incêndios e queimadas aplicam?

13. Que instrumentos usam para o combate de queimadas?

Anexo V: Estrutura metodológica para a realização do presente trabalho

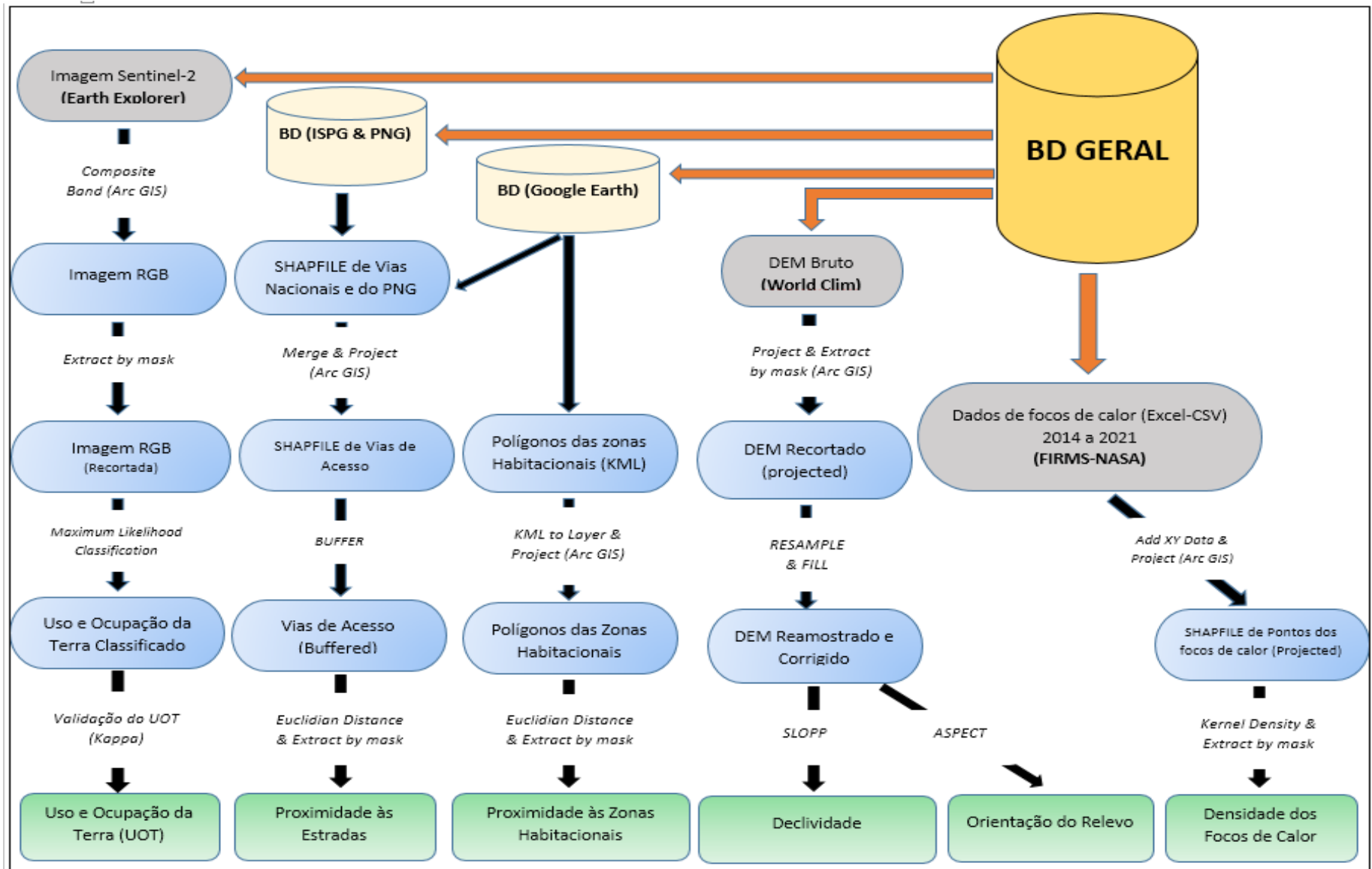


Figura 25: Fase I do Processamento (Geração das Variáveis de Estudo)

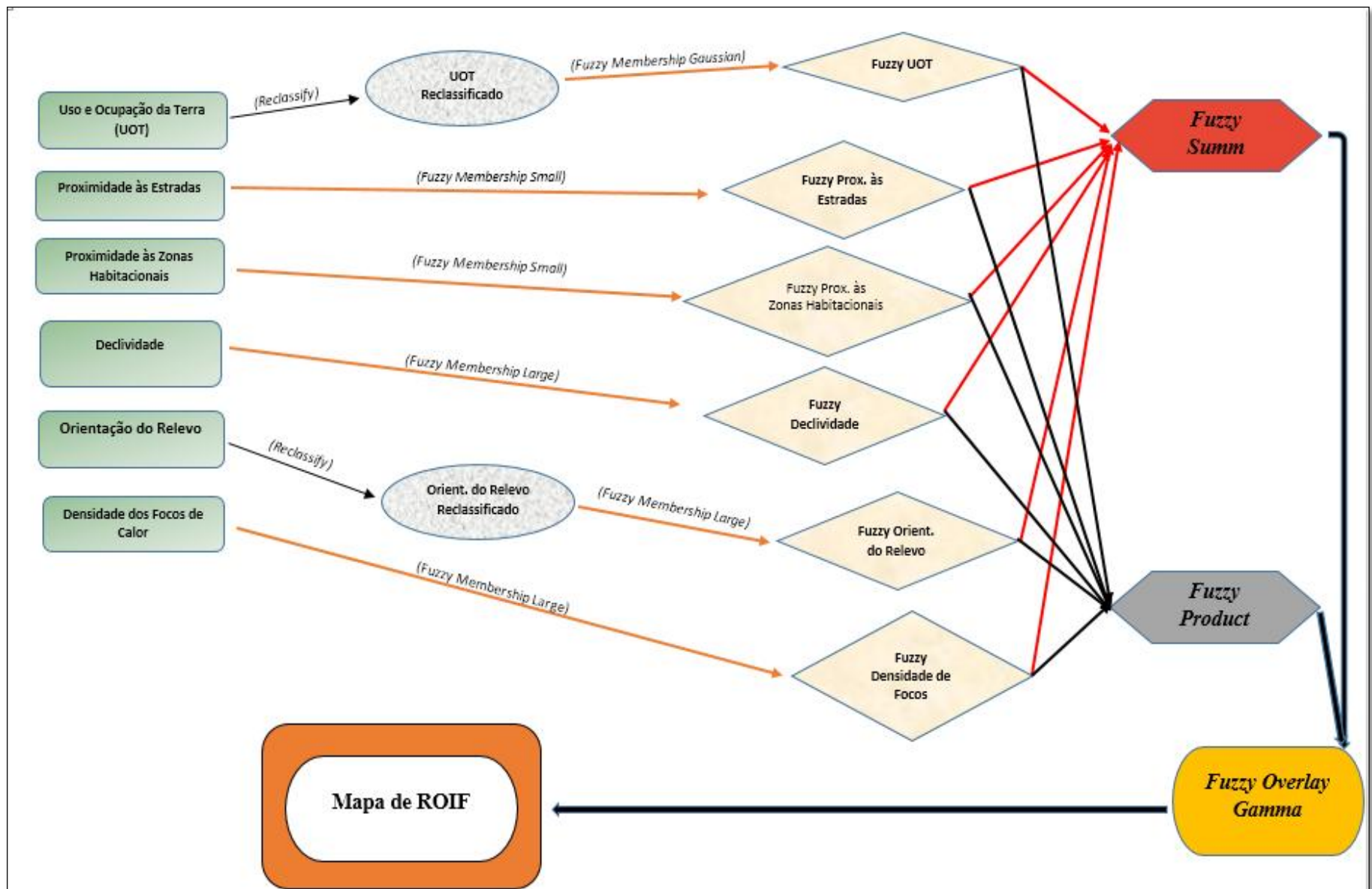


Figura 26: Fase II do Processamento das variáveis aplicando a modelagem *fuzzy* (análise de sobreposição *fuzzy*)