



Raffael Vieira Ramos

**Incêndios Florestais -
Uso de visualização geométrica para análise de risco**

Recife

Agosto de 2025

Raffael Vieira Ramos

Incêndios Florestais - Uso de visualização geométrica para análise de risco

Artigo apresentado ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE
Departamento de Estatística e Informática
Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação

Orientador: Silvana Bocanegra; Rayanna Alves

Recife
Agosto de 2025

Incêndios Florestais – Uso de visualização geométrica para análise de risco

[Raffael Vieira Ramos] ¹, [Silvana Bocanegra] ², [Rayanna Barroso de Oliveira Alves] ³

¹Departamento de Estatística e Informática – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, - CEP: 52171-900 – Recife – PE - Brasil

[raffael.vieira@ufrpe.br]

Resumo. Este trabalho apresenta um modelo de diagrama voltado à avaliação do risco de incêndios florestais em diferentes municípios brasileiros, utilizando uma metodologia empírica de visualização geométrica que possibilita o monitoramento temporal do risco e potencializa ações de prevenção, tomada de decisão e resposta rápida pelos órgãos responsáveis. Para tanto, foi adaptado um modelo originalmente proposto pela Universidade Politécnica da Catalunya e utilizado em parceria com o Instituto de Redução de Riscos e Desastres de Pernambuco (IRRD-PE) para a COVID-19. Os resultados evidenciam que o modelo identifica períodos críticos e áreas prioritárias, comprovando sua aplicabilidade na gestão do risco de incêndios florestais.

Abstract. This work presents a diagram model aimed at assessing forest fire risk in different Brazilian municipalities, using an empirical geometric visualization methodology that enables temporal risk monitoring and enhances prevention actions, decision-making, and rapid response by responsible agencies. To this end, a model originally proposed by the Polytechnic University of Catalonia was adapted and used in partnership with the Institute for Risk and Disaster Reduction of Pernambuco (IRRD-PE) for COVID-19. The results show that the model identifies critical periods and priority areas, proving its applicability in forest fire risk management.

1. Introdução

Os incêndios florestais vêm se intensificando globalmente nas últimas décadas, impulsionados por mudanças climáticas, eventos extremos e pressões antrópicas. O aumento da frequência e da intensidade desses eventos está diretamente relacionado ao aquecimento global, à alteração dos padrões de precipitação e à elevação das temperaturas médias, fatores que tornam as paisagens mais suscetíveis à propagação do fogo. Além dos impactos ambientais — como a perda de biodiversidade e a degradação do solo — os incêndios florestais também comprometem a saúde pública, geram prejuízos econômicos e contribuem significativamente para as emissões de gases de efeito estufa. [Little et al. 2025].

Em 2023, a Europa e a América Latina registraram alguns dos piores episódios de incêndios florestais já documentados, com mais de 500 mil hectares afetados apenas no continente europeu [European Commission 2024]. O cenário é agravado por eventos climáticos extremos, como El Niño, que intensificam os períodos de seca e elevam o risco de incêndios em regiões tropicais e subtropicais. A literatura recente destaca a necessidade de aprimorar a previsão, o monitoramento e a gestão do risco de incêndios,

com ênfase em abordagens integradas que considerem fatores ambientais, sociais e tecnológicos [Carta et al. 2023].

No Brasil, a vulnerabilidade aos incêndios florestais resulta da diversidade climática, mudanças no uso do solo e da expansão agropecuária, afetando biomas como Amazônia, Cerrado e Pantanal. Evidências científicas demonstram que o desmatamento, as variações climáticas e as práticas humanas aumentam os focos de calor e áreas queimadas. Avanços recentes incluem modelos preditivos e sensoriamento remoto na gestão do risco, ressaltando a necessidade de políticas e alertas regionais [Nunes et al. 2023].

O IRRD-PE (Instituto para Redução de Riscos e Desastres de Pernambuco) é uma iniciativa formada pela parceria entre o GEOSERE-UFRPE e o LIKA-UFPE, com o objetivo de realizar análises ambientais para gerar informações sobre riscos de diversos desastres. O modelo proposto neste trabalho foi desenvolvido a partir da abordagem empregada pelo IRRD na representação do risco de propagação da COVID-19, em colaboração com a Universidade Politécnica da Catalunya [Català et al. 2021].

A metodologia dos diagramas de risco já foi empregada com sucesso em diferentes campos, destacando-se como alternativa inovadora para a visualização e compreensão da dinâmica de perigos ao longo do tempo. Essa abordagem foi utilizada por [Paiva Neto et al. 2022] no estudo da desertificação, ao aplicar diagramas de risco para avaliar a degradação do solo em regiões áridas e semiáridas do Nordeste brasileiro, identificando áreas críticas quanto ao avanço desse fenômeno. De maneira similar, [Gomes et al. 2022] empregou essa metodologia para analisar riscos de alagamentos e enchentes em bairros do Recife, evidenciando a influência dos índices de precipitação e das variações das marés na distribuição espacial do risco.

O objetivo deste trabalho é, a partir da geração de diagramas geométricos, analisar o risco de incêndios florestais em municípios brasileiros, utilizando dados abertos do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) sobre risco de fogo — calculados com base em variáveis meteorológicas, cobertura vegetal e focos de calor — e, simultaneamente, explicitar a aplicabilidade do modelo. Nesse sentido, suas principais finalidades são:

1. Oferecer à sociedade material visual que traduza condições ambientais complexas em representações intuitivas, orientando decisões cotidianas (como a restrição de queimadas, planejamento de atividades rurais e adoção de condutas seguras), contribuindo para a proteção de vidas, do patrimônio e dos ecossistemas;
2. Prover suporte operacional a órgãos de resposta e gestão (Corpos de Bombeiros, Defesa Civil e secretarias de Meio Ambiente e de Agricultura), subsidiando a alocação antecipada de recursos, a definição de níveis de prontidão, a emissão de alertas e a coordenação de ações preventivas e de supressão em janelas de maior probabilidade de ignição e propagação;
3. Servir como insumo técnico para instituições de monitoramento e planejamento territorial, favorecendo o zoneamento preventivo, a priorização de áreas críticas, a avaliação de efetividade de medidas de manejo e a integração de políticas públicas voltadas à prevenção e ao controle de incêndios florestais.

2. Trabalhos Relacionados

Pesquisa conduzida por [Nunes et al. 2023] abrangeu as regiões da Amazônia, Cerrado e Pantanal, avaliando a associação entre variáveis climáticas, como precipitação e temperatura, e a incidência de incêndios florestais nesses biomas. Utilizando bases de dados abertas e séries históricas provenientes de satélites e órgãos oficiais, os autores mostraram que períodos de elevada temperatura e déficit de precipitação estão diretamente ligados ao aumento do risco e da ocorrência do fogo. Os resultados evidenciaram que, além das condições climáticas extremas, fatores antrópicos como desmatamento e expansão agrícola amplificam a vulnerabilidade ambiental, destacando a necessidade de políticas regionais de monitoramento, prevenção e controle adaptadas às especificidades de cada bioma.

Na Caatinga, pesquisa conduzida por [Bello et al. 2023] na Universidade Federal de Itajubá empregou Sistemas de Informação Geográfica e o método de análise hierárquica gaussiano (AHP-Gaussiano) para mapear o risco de fogo no bioma. O estudo integrou dados de uso e ocupação do solo, declividade, precipitação e temperatura, além do histórico de focos de calor (INPE), demonstrando que o risco de fogo está fortemente associado a baixos índices pluviométricos e à predominância de atividades agrossilvopastoris. As regiões do nordeste e centro-leste da Caatinga destacaram-se com alto risco. Os autores concluem que políticas voltadas ao monitoramento e à prevenção são essenciais, dada a vulnerabilidade crescente da Caatinga às mudanças climáticas.

Estudo de [Vieira et al. 2020], realizado em Santa Catarina pela equipe da Epagri/CIRAM, aplicou a Fórmula de Monte Alegre (FMA) e sua versão modificada para estimar o perigo de incêndios florestais a partir de dados meteorológicos diários de dezenas de estações automáticas distribuídas pelo estado. Os autores obtiveram uma correspondência entre os dados analisados, índices calculados e a visualização do risco nos mapas gerados durante o estudo.

Por fim, o agravamento dos incêndios florestais no Brasil, especialmente nos anos recentes, tem sido acompanhado por um aumento expressivo nas áreas queimadas e nos impactos à saúde pública e à economia. Relatórios jornalísticos baseados no Monitor do Fogo — uma plataforma nacional de monitoramento desenvolvida pelo MapBiomas que integra imagens de satélite para identificar e quantificar áreas afetadas por incêndios em tempo quase real — indicam que, de janeiro a agosto de 2024, mais de 11,39 milhões de hectares foram atingidos por incêndios no Brasil, com destaque para a Amazônia e áreas agrícolas, evidenciando a gravidade do cenário atual e a necessidade de políticas integradas de resposta e prevenção [Agência Brasil 2024].

3. Materiais e Métodos

3.1. Dados

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos do Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)¹, órgão federal de referência no monitoramento nacional de queimadas e incêndios florestais. O INPE disponibiliza, de forma diária e gratuita, mapas e séries históricas que abrangem variáveis meteorológicas

¹Programa Queimadas do INPE. Disponível em: <https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/portal/>. Acessado em 30/07/2025

essenciais — precipitação acumulada (produto IMERG), em milímetros por dia (*mm/dia*); umidade relativa mínima do ar, em porcentagem (%); e temperatura máxima diária (GFS), em graus Celsius (°C). Adicionalmente, o modelo utiliza a detecção de focos de calor por sensoriamento remoto e informações sobre cobertura vegetal. A detecção de focos provém de sensores imageadores a bordo de satélites de observação da Terra, como o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e o VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), que operam em bandas de infravermelho capazes de identificar assinaturas termais. As informações sobre cobertura vegetal e uso do solo são baseadas nos produtos MapBiomas/MODIS/IGBP para todo território nacional [INPE 2019].

Por meio do Programa Queimadas, o INPE desenvolveu e consolidou a metodologia operacional para cálculo do risco de fogo, que considera a suscetibilidade da vegetação à queima em escala nacional. Este método oficial é amplamente utilizado em políticas públicas, na emissão de alertas ambientais e suporte à gestão de desastres naturais, garantindo padronização e comparabilidade dos resultados em diferentes regiões do país.

O grão temporal adotado nesta análise é o diário, correspondendo ao período de disponibilização dos dados pelo INPE. Essa granularidade permite captar variações rápidas na evolução do risco de incêndio, aprimorando o monitoramento e a capacidade de intervenção em contextos emergenciais. Ressalta-se que o presente estudo utiliza diretamente o índice de risco de fogo calculado e publicado pelo INPE, analisando os valores oficiais para caracterizar e comparar as dinâmicas de risco nos municípios selecionados.

3.2. Risco de fogo observado do INPE

O risco de fogo observado (RF) é estimado a partir do conceito dos “Dias de Secura” (PSE), que representa um número hipotético de dias consecutivos sem chuva, ponderando não apenas a ausência de precipitação, mas também o volume acumulado e a distribuição temporal das chuvas nos 120 dias anteriores à análise. Esse indicador capta o nível de ressecamento da vegetação, fator determinante para a facilidade de ignição do fogo. A partir do risco básico calculado pelo PSE, são aplicados fatores ambientais adicionais referentes à umidade relativa mínima do ar, temperatura máxima diária, latitude e elevação do terreno, resultando em um valor do risco de fogo mais sensível à condição atmosférica do dia [INPE 2019]. Os principais passos do cálculo estão descritos a seguir:

3.2.1. Cálculo dos fatores de precipitação (fp)

Para 11 intervalos distintos (1 até 120 dias), calcula-se a influência da chuva por meio de funções exponenciais decrescentes, diminuindo o efeito da precipitação quanto mais distante ela ocorre no passado. Os fatores de precipitação variam de 0 (chuva muito recente) a 1 (longos períodos sem precipitação).

$$fp1 = e^{-0.14 \times prec\ 1}$$

$$fp2 = e^{-0.07 \times (prec\ 2 - prec\ 1)}$$

$$fp3 = e^{-0.04 \times (prec\ 3 - prec\ 2)}$$

$$fp4 = e^{-0.03 \times (prec\ 4 - prec\ 3)}$$

$$fp5 = e^{-0.02 \times (prec\ 5 - prec\ 4)}$$

$$fp6a10 = e^{-0.01 \times (prec\ 10 - prec\ 5)}$$

$$fp11a15 = e^{-0.008 \times (prec\ 15 - prec\ 10)}$$

$$fp16a30 = e^{-0.004 \times (prec\ 30 - prec\ 16)}$$

$$fp31a60 = e^{-0.002 \times (prec\ 60 - prec\ 30)}$$

$$fp61a90 = e^{-0.001 \times (prec\ 90 - prec\ 60)}$$

$$fp91a120 = e^{-0.0007 \times (prec\ 120 - prec\ 90)}$$

3.2.2. Cálculo dos dias de secura (PSE)

O PSE é dado pela multiplicação dos fatores de precipitação:

$$PSE = 105 \times fp1 \times fp2 \times fp3 \times fp4 \times fp5 \times fp6a10 \times fp11a15 \times fp16a30 \times fp31a60 \times fp61a90 \times fp91a120.$$

O valor simula quantos dias a vegetação está sofrendo déficit de água, capturando a predisposição para queimar.

3.2.3. Risco de fogo básico (Rb)

O “Risco de Fogo Básico” (Rb) é uma métrica intermediária fundamental: ela reflete a propensão da vegetação à queima, incorporando o PSE e o tipo de vegetação do local por meio de uma constante de flamabilidade (“A”), associada a diferentes classes de vegetação. A equação do risco básico é:

$$Rb_{(n)} = \frac{0,8 \times \left\{ 1 + \text{sen} \left[\left((A_n \times PSE) - 90 \right) \times \left(\frac{3,14}{180} \right) \right] \right\}}{2}.$$

O valor de “A” varia conforme a Tabela 1, que classifica as coberturas vegetais de acordo com sua suscetibilidade ao fogo:

Tabela 1. Valores assumidos pela constante “A” para classes de vegetação.

Classe de Vegetação	Ombrófila densa; alagados	Florestas Decíduase sazonais	Florestas Contato; Campinarana	Savana arbórea; Caatinga	Savana; Caatinga aberta	Agricultura e diversos	Pastagens Gramíneas
Cte. “A”	1,5	1,72	2,0	2,4	3,0	4,0	6,0
<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7

Quanto maior a constante “A”, maior a flamabilidade da vegetação, ou seja, pastagens e gramíneas são mais suscetíveis ao fogo do que florestas densas.

3.2.4. Aplicação de fatores ambientais

Fator de umidade relativa do ar (FU) - Valores de umidade abaixo de 40% aumentam o risco de fogo, pois caracterizam ar mais seco e inflamável e diminuem para valores acima desse limiar.

$$FU = [UR \times (-0.006)] + 1,3.$$

Fator de temperatura (FT) - É considerada a maior temperatura observada ao longo do dia. Temperaturas acima de 30° aumentam linearmente o risco.

$$FT = (T_{\{max\}} \times 0,02) + 0,4.$$

Fator latitudinal (FLAT) - O fator latitudinal ajusta o risco em função da latitude, pois regiões mais afastadas do equador tendem a apresentar maior sazonalidade e variação climática.

$$FLAT = (1 + abs(latitude[graus]) * 0,003).$$

Fator de elevação (FELV) - O fator de elevação considera a elevação topográfica do terreno, já que altitudes maiores estão associadas a menor umidade do ar e temperaturas mais baixas, impactando a vegetação.

$$FELV = 1 + elevação[metros] * 0,00003.$$

3.2.5. Risco de fogo observado (RF)

Para chegar ao risco de fogo observado (RF), multiplicam-se o risco básico (Rb), o fator de umidade relativa (FU), o fator de temperatura (FT) e os fatores de ajuste topográfico latitudinal (FLAT) e elevação (FELV):

$$RF = Rb \times FU \times FT \times FLAT \times FELV.$$

Os resultados são classificados em cinco categorias: mínimo, baixo, médio, alto e crítico, de acordo com faixas numéricas padronizadas, sendo definido como risco mínimo valores inferiores a 0,15; risco baixo para valores maiores que 0,15 e até 0,40; risco médio para valores acima de 0,40 até 0,70; risco alto para valores superiores a 0,70 até 0,95; e risco crítico para valores superiores a 0,95.

Caso sejam detectados focos de queima por satélite em regiões classificadas inicialmente em risco mínimo ou baixo, e sem precipitação recente, o índice é corrigido para alto risco, refletindo eventos de ignição não capturados apenas pelos condicionantes meteorológicos.

3.3. Tendência temporal de risco (TTR)

O índice de tendência temporal de risco (TTR) foi desenvolvido para refinar a análise da evolução do risco de incêndios florestais, baseia-se nos princípios de análise de risco dinâmico, onde a direção da mudança temporal é considerada tão relevante quanto a magnitude absoluta do fenômeno observado.

O TTR é calculado através de um algoritmo iterativo com piso crescente adaptativo que implementa regras matemáticas específicas para garantir consistência direcional. A formulação completa pode ser expressa pela seguinte sequência de operações:

Etapa 1 - Base inicial:

$$TTR_t^{base} = MM7_t;$$

Etapa 2 - Regra de aceleração obrigatória:

$$TTR_t = \max(TTR_t^{base}, TTR_{t-1} + H(\Delta RF_t) \times [\alpha \times \Delta RF_t + \delta_{min}]);$$

Etapa 3 - Regra de piso crescente:

$$TTR_t = \max(TTR_t, TTR_{t-1} \times H(-\Delta RF_t));$$

Onde a formulação condensada pode ser representada como:

$$TTR_t = \max(MM7_t, TTR_{t-1} + H(\Delta RF_t) \times [\alpha \times \Delta RF_t + \delta_{min}]).$$

A construção do TTR baseia-se em componentes matemáticos que asseguram sua robustez e coerência temporal. O termo $MM7_t$ representa a média móvel de 7 dias do risco de fogo observado no instante t , funcionando como base natural do índice. Essa média suaviza variações espúrias de curto prazo e reflete o comportamento semanal médio do risco. Já o termo TTR_{t-1} , correspondente ao valor do índice no período anterior, garante continuidade temporal e serve de ancoragem para as regras de crescimento mínimo. Complementarmente, a variação $\Delta RF_t = RF_t - RF_{t-1}$ quantifica a direção e intensidade das mudanças no risco entre períodos consecutivos, constituindo um insumo fundamental para avaliar tendências.

A ativação do mecanismo de amplificação ocorre por meio da função degrau de Heaviside $H(\Delta RF_t)$ definida como $H(x) = 1$ se $x > 0$ e $H(x) = 0$ caso contrário. Essa função assegura que apenas variações positivas do risco impactem o crescimento do índice. O coeficiente α , calibrado em 0,3, regula a intensidade da resposta a essas variações, ampliando proporcionalmente os aumentos detectados. Por fim, o incremento mínimo garantido δ_{min} estabelecido em 0,01 garante um piso de crescimento para o índice sempre que houver elevação no risco de fogo, mesmo que discreta, prevenindo a estagnação do TTR em contextos de risco ascendente.

O TTR possui propriedades matematicamente garantidas que asseguram a qualidade de sua resposta diante das variações no risco observado. A *monotonicidade ascendente* garante que, para todo t , se $RF_t \geq RF_{t-1}$, então $TTR_t \geq TTR_{t-1}$, eliminando completamente a possibilidade de desaceleração diante de aumento do risco. A *proporcionalidade amplificada* assegura que incrementos mais intensos em RF resultem em aumentos proporcionalmente maiores em TTR, conforme o coeficiente α . Já a *estabilidade em patamares* permite que, mesmo em períodos de RF constante, o índice mantenha estabilidade, preservando sinais de alerta. Por fim, a *sensibilidade direcional* permite que o índice distinga entre crescimento, estabilização e decréscimo do risco, respondendo de forma diferenciada a cada cenário.

O TTR fornece uma leitura dinâmica da evolução do risco, integrando três dimensões analíticas essenciais. A *magnitude atual* é capturada pela componente $MM7_t$, que reflete o nível absoluto de risco e mantém uma escala compatível com o risco de fogo observado. A *aceleração temporal*, representada pelo termo $\alpha \times \Delta RF_t$, amplia os sinais em contextos de crescimento do risco, destacando deteriorações ambientais. Por fim, a

persistência crítica, implementada por meio do mecanismo de piso crescente, mantém a memória de níveis críticos recentes, sinalizando risco elevado mesmo diante de quedas temporárias.

3.4. Índice de Risco de Incêndio – RI

O índice de risco de incêndio (RI) adotado neste trabalho sintetiza, em um único valor, a combinação entre a situação atual do risco de fogo observado (RF) em uma localidade e a sua tendência temporal de risco (TTR), permitindo uma avaliação dinâmica e contextualizada do perigo de incêndios florestais. A definição formal do índice pode ser expressa por:

$$RI = TTR \times RF.$$

Essa abordagem espelha a estrutura de índices de risco desenvolvidos em outros cenários dinâmicos, como epidemias e eventos hidrológicos, em que o comportamento atual e sua relação com os extremos recentes orientam o cálculo do potencial de agravamento e da necessidade de intervenção.

3.5. O diagrama de risco

Para a geração dos diagramas desenvolvidos neste estudo, foi utilizada como base o código escrito na linguagem Python desenvolvido pela equipe do IRRD² para os diagramas de risco da COVID-19, mas aqui ajustada à temática de incêndios florestais.

No diagrama obtido, o eixo horizontal (X) apresenta o risco de fogo observado diário (RF), enquanto o eixo vertical (Y) contém os valores do índice de tendência temporal de risco (TTR). Cada ponto no gráfico corresponde ao risco combinado de incêndio estimado para um dia específico, e a conexão entre esses pontos ao longo do tempo, realizada por uma linha tracejada, evidencia o percurso temporal do risco de incêndios, permitindo o acompanhamento de tendências e a identificação de episódios críticos ou recorrentes.

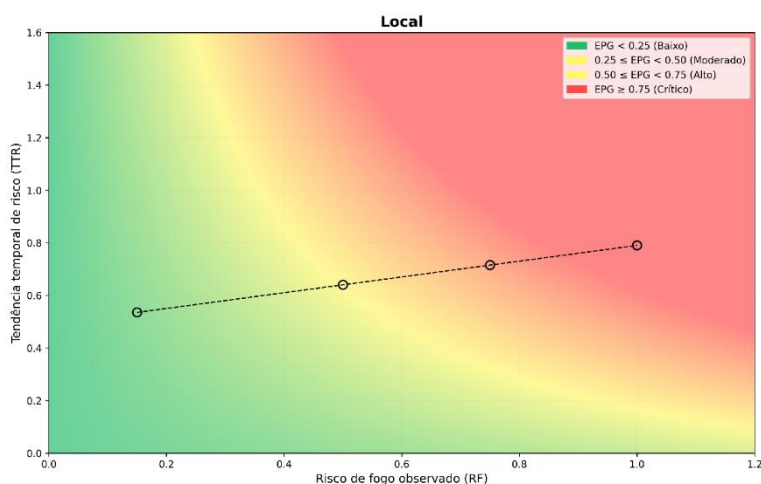


Figura 1. Exemplo de diagrama de risco.

² riskdiagrams-covid19. Disponível em: <https://github.com/allissondantas/riskdiagrams-covid19>. Acessado em 30/07/2025

A leitura do diagrama de risco para incêndios florestais permite distinguir rapidamente três cenários: pontos posicionados sobre a região verde indicam dias de baixo risco, mesmo quando considerados os extremos recentes, refletindo condições ambientais desfavoráveis à ignição do fogo; pontos na zona amarela (moderado/alto) sinalizam dias em que o risco se aproxima dos maiores valores do histórico recente; já na região vermelha estão registrados os períodos críticos, nos quais o risco observado é elevado e relevante frente ao comportamento recente da localidade, sugerindo alta probabilidade de ocorrência de fogo e propagação de incêndios.

No contexto deste estudo, o risco de fogo observado (RF) expressa a “velocidade” do quadro de risco, ao sintetizar a intensidade corrente resultante da combinação de variáveis meteorológicas, características da vegetação e fatores de ajuste ambientais. Por sua vez, a tendência temporal de risco (TTR) reflete a “aceleração”, ao capturar a direção e a magnitude da mudança do risco em relação aos dias anteriores por meio de regras que amplificam incrementos positivos e preservam a memória recente via piso crescente. Nessa perspectiva, combinações de alta velocidade e baixa aceleração (RF elevado e TTR contido) não configuram, por si sós, criticidade operacional, pois indicam um patamar alto sem ímpeto imediato de deterioração, permanecendo na área verde do diagrama; do mesmo modo, alta aceleração e baixa velocidade (TTR elevado com RF ainda reduzido) denotam ambiente em rápida piora, porém com nível absoluto ainda moderado, o que mantém a leitura no campo não crítico (área verde/amarela). À medida que ambos os componentes se elevam simultaneamente — isto é, quando o RF se encontra em patamares altos e o TTR indica aceleração positiva persistente —, o cenário migra para zonas superiores do plano, caracterizando condição crítica (região vermelha), uma vez que coexistem perigo elevado e dinâmica de agravamento.

As áreas do diagrama e suas respectivas interpretações, definidas com base em uma calibração empírica fundamentada na visualização dos resultados, são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2. Níveis de risco de incêndio. Fonte: O autor.

Índice	Risco
$RI < 0.25$	Baixo
$0.25 \leq RI < 0.50$	Moderado
$0.50 \leq RI < 0.75$	Alto
$RI \geq 0.75$	Crítico

4. Resultados (Estudo de caso)

O objetivo central foi observar diferentes contextos ambientais brasileiros, onde o modelo executado foi capaz de refletir a realidade local e capturar tanto a escalada quanto a persistência, ou mesmo a ausência, do risco de incêndio florestal ao longo do tempo. A escolha dos municípios considerou o contraste entre áreas reconhecidamente vulneráveis a incêndios florestais e regiões cujos registros históricos apontam para risco mínimo.

Cada diagrama contempla a evolução diária do risco ao longo de um período de 30 dias, permitindo a visualização do comportamento do índice frente às variações climáticas e ambientais específicas.

4.1. Estudo de Caso: Cotriguaçu (MT)

A Figura 2 mostra o risco de incêndio florestal na região de Cotriguaçu, localizada no estado de Mato Grosso. O município está situado na região de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado, em área conhecida como "arco do desmatamento", possuindo 76% de sua área territorial coberta por floresta natural. A região apresenta combinação de vegetação nativa e áreas de pastagem, histórico de uso do fogo para manejo agropastoril e condições climáticas propícias à propagação do fogo durante a estiagem. O município implementou oficialmente o período proibitivo do uso do fogo a partir de 1º de julho de 2025, medida tomada especificamente para prevenir incêndios florestais durante a estiagem, confirmando que julho marca o início do período crítico na região³.

No período analisado no diagrama, de 1º a 30 de julho de 2025, verificou-se uma trajetória ascendente consistente do risco, iniciando em patamares de baixo risco e evoluindo progressivamente até níveis elevados ao final da série temporal. Essa escalada sistemática corrobora o padrão sazonal esperado para a região Centro-Oeste durante a transição para a estação seca, quando as condições meteorológicas se tornam progressivamente mais favoráveis à ignição e propagação do fogo. A escalada observada reflete fielmente a intensificação das condições de seca atmosférica, elevação das temperaturas máximas e redução da umidade relativa do ar durante o período crítico.

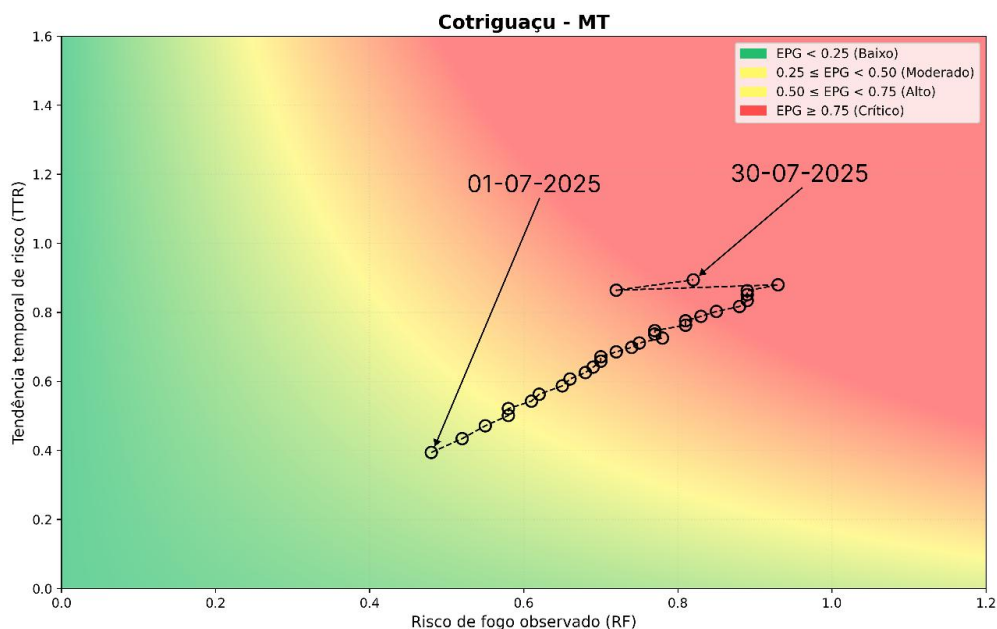


Figura 2. Gráfico com risco de incêndio florestal na região de Cotriguaçu - MT.

³Uso do fogo está proibido a partir de hoje em Mato Grosso; Prefeitura de Cotriguaçu emite alerta à população. Disponível em: <https://www.cotriguacu.mt.gov.br/portal/noticias/0/3/1832/uso-do-fogo-esta-proibido-a-partir-de-hoje-em-mato-grosso-prefeitura-de-cotriguacu-emite-alerta-a-populacao>. Acessado em 30/07/2025

4.2. Estudo de Caso: Palmeiras (BA)

O município de Palmeiras está situado dentro do Parque Nacional da Chapada Diamantina (BA), na transição entre os biomas Caatinga e Cerrado. A cidade possui extensa cobertura vegetal preservada inserida no contexto do parque nacional, com altitude variando de 500 a 1.200 metros, o que influencia diretamente as condições microclimáticas locais. A detecção de incêndio florestal de grandes proporções iniciado em 27 de março de 2025 na região da Chapada Diamantina, conforme amplamente noticiado pela mídia nacional⁴, justifica a escolha desta região como representativa de cenários reais de risco extremo para incêndios florestais.

A Figura 3 apresenta o município de Palmeiras no período de 2 a 31 de março de 2025. Pode ser observada uma crescente constante entre os níveis de risco médio e alto durante a primeira parte da série temporal, e na segunda parte a transição para risco crítico, mantendo-se neste patamar até o final da série temporal analisada. Os incêndios florestais ocorridos na região durante o período final corroboram diretamente com a análise apresentada.

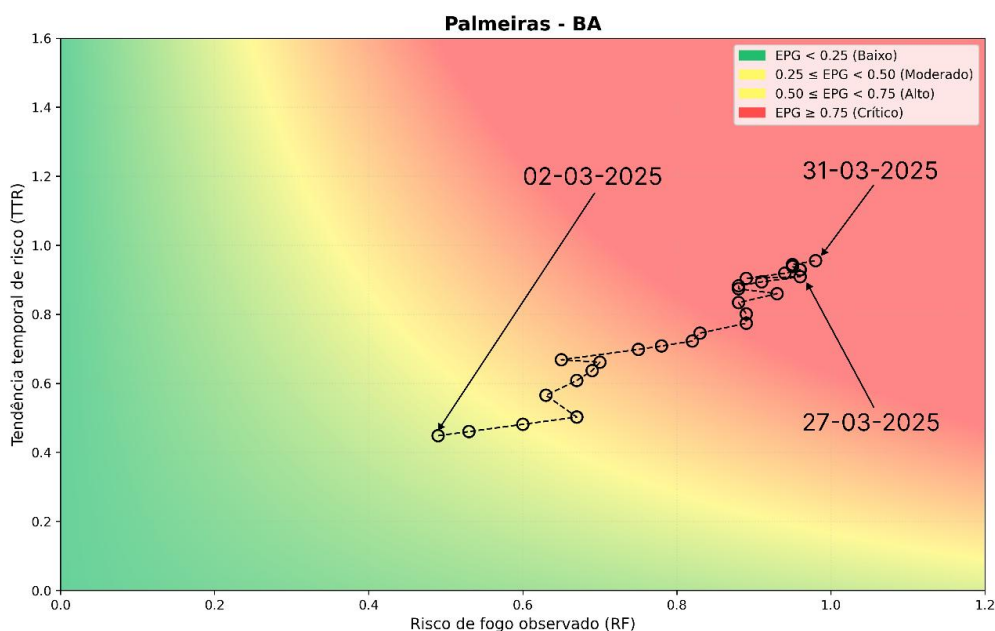


Figura 3. Gráfico com risco de incêndio florestal na região de Palmeiras - BA.

4.3. Estudo de Caso: Ubatuba (SP)

Como contraponto, foi selecionado o município litorâneo de Ubatuba, em São Paulo, reconhecido por seu clima úmido, cobertura predominante de Mata Atlântica e baixo histórico de incêndios florestais, especialmente durante o mês de junho, tradicionalmente associado a menor risco em função da elevada umidade atmosférica e elevado índice pluviométrico.

⁴BA: incêndio florestal atinge Parque Nacional da Chapada Diamantina. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/nordeste/ba/ba-incendio-florestal-atinge-parque-nacional-da-chapada-diamantina/>. Acessado em 30/07/2025

A Figura 4 exibe o diagrama de risco da região no período de 1º a 30 de junho de 2025. Pode ser observado que, durante toda série, o município permaneceu na área de baixo risco. Esse resultado confirma que as condições meteorológicas e ambientais locais raramente favorecem o desenvolvimento ou a propagação significativa de incêndios florestais.

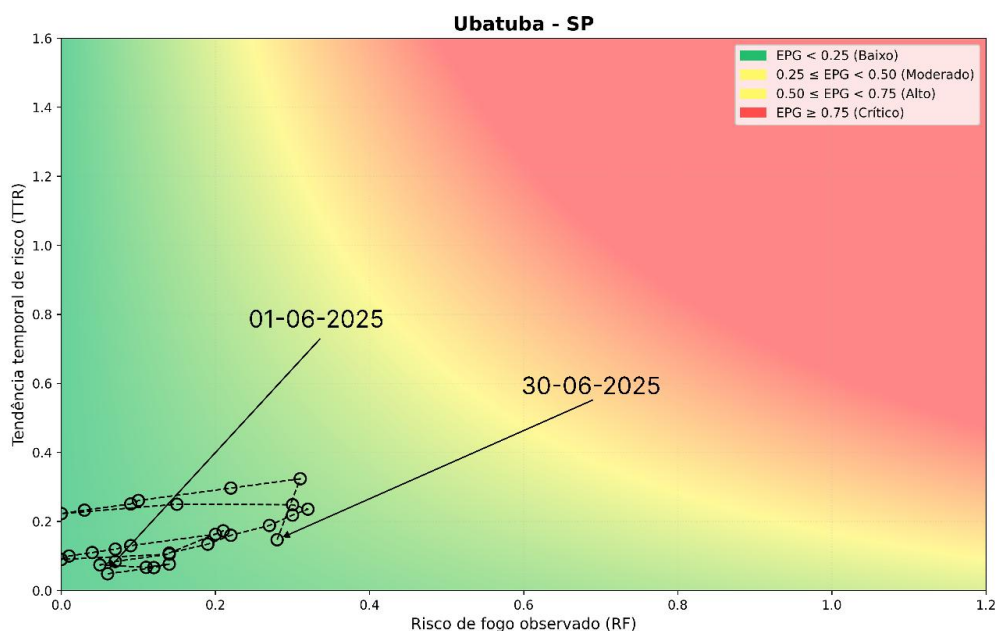


Figura 4. Gráfico com risco de incêndio florestal na região de Ubatuba - SP.

5. Discussões e Trabalhos futuros

Os achados indicam que os índices, métodos de cálculo e modelos desenvolvidos neste estudo, fundamentados em uma abordagem empírica, apresentam consistência interna e são compatíveis com o contexto em que foram aplicados. Essa abordagem reforça o caráter preventivo da análise, permitindo a identificação de momentos críticos e auxiliando na gestão de riscos em cenários reais.

Contudo, a coleta e atualização manual dos dados, embora suficiente para os experimentos realizados neste trabalho, revelam-se limitantes para a escalabilidade da aplicação dos diagramas em contextos operacionais e em diferentes municípios e biomas. Diante desse desafio, recomenda-se a automação dos processos de coleta, pré-processamento e atualização dos dados meteorológicos e ambientais, utilizando serviços web e APIs disponibilizados pelo INPE.

Futuramente, sugere-se expandir o modelo para outros municípios e biomas do Brasil, a fim de avaliar o desempenho do método em regiões com características distintas. Essa ampliação permitirá verificar a robustez do modelo, aumentando o nível de confiança nos resultados e aprimorando sua aplicação em diferentes cenários nacionais.

Referências

- Agência Brasil (2024). "Brasil teve 11,39 milhões de hectares atingidos pelo fogo este ano". <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-09/brasil-teve-1139-milhoes-de-hectares-atingidos-pelo-fogo-este-ano>. [Acessado em 09/2024].
- Bello, J. P.; Freitas, A. C. V.; Vieira, E. M. (2023). Análise do Risco de Fogo para o Bioma Caatinga, *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 32, p. 734-753.
- Carta, F.; Zidda, C.; Putzu, M.; Loru, D.; Anedda, M.; Giusto, D. (2023). Advancements in Forest Fire Prevention: A Comprehensive Survey. *Sensors*, vol. 23, n. 14, p. 6635.
- Català, M.; Marchena, M.; Conesa, D.; Palacios, P.; Urdiales, T.; Alonso, S.; Alvarez Lacalle, E.; Lopez, D.; Cardona, P.-J.; Prats, C. (2021). Monitoring and analysis of covid-19 pandemic: The need for an empirical approach., *Frontiers in Public Health*, vol. 9, p. 806.
- European Commission (2024). "2023 among the five worst years for wildfires in Europe, 2024 provides some relief". https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/2023-among-five-worst-years-wildfires-europe-2024-provides-some-relief-2024-11-19_en. [Acessado em 11/2024].
- Gomes, I. de M. L.; Bocanegra, S.; Albuquerque, J. (2022). Alagamentos e inundações - uso de visualização geométrica para análise de risco associados ao volume de chuva e altura das marés na cidade do Recife. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Sistemas de Informação, Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2019). Método do Cálculo do Risco de Fogo do Programa do INPE – Versão 11. Relatório Técnico, São José dos Campos.
- Little, K.; Vitali, R.; Belcher, C. M.; Kettridge, N.; Pellegrini, A. F. A.; Ford, A. E. S. et al. (2025). Priority research directions for wildfire science: views from a historically fire-prone and an emerging fire-prone country. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 380, n. 1924.
- Nunes, R. S. C.; Ferreira, A. T. S.; Oliveira-Júnior, J. F.; Mendes, L. B. N.; Palhares, A. G.; Siqueira, D. S. (2023). Fires in Brazilian Biomes: Association with Precipitation, Temperature and Interactive Models for Risk Assessment. *Mercator*, vol. 22, e22023.
- Paiva Neto, J. A. de; Bocanegra, S.; Albuquerque, J. (2022). Desertificação - uso de visualização geométrica para análise de risco. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Sistemas de Informação, Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- Vieira, H. J.; Miszinski, J.; Blainski, É. (2020). Risco de incêndio florestal: Fórmula de Monte Alegre (FMA). Relatório do Sistema AGROCONNECT, Epagri.