

# Visualização de Dados Aplicada ao Monitoramento de Queimadas com Dados NOAA: Uma Revisão Sistemática

Julia Emili Kroeker Petry\*  
juliaekpetry@gmail.com  
Universidade Federal de Santa Catarina

Andréa Sabedra Bordin‡  
andrea.bordin@ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina

Letícia Torcheto Ramos†  
ramos.letitorcheto@gmail.com  
Universidade Federal de Santa Catarina

Cristian Cechinel§  
cristian.cechinel@ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina

## Resumo

This paper presents a systematic review of the literature, conducted following the PRISMA protocol, on data visualization techniques applied to wildfire monitoring using NOAA data. Based on the analysis of three selected studies, the main visualization approaches identified include interactive dashboards, geospatial maps, and alert systems. The findings highlight recurring challenges such as the integration of heterogeneous data, uncertainty communication, and the lack of usability evaluation. This study contributes by synthesizing the state of the art and proposing guidelines for developing more robust, accessible, and effective tools to support researchers, environmental managers, and communities in managing wildfire-related risks.

## Keywords

NOAA, Wildfire, Dashboard, Data Visualization

## 1 Introdução

As queimadas, de origem natural ou provocadas por atividades humanas, figuram entre os fenômenos ambientais de maior impacto para os ecossistemas, a biodiversidade e a saúde pública. Nas últimas décadas, a intensificação das mudanças climáticas, associada a práticas como o desmatamento e a expansão agrícola, tem contribuído para o aumento da frequência e da severidade desses eventos em diferentes partes do mundo. As consequências das queimadas não se limitam à destruição da cobertura vegetal, mas também incluem a emissão massiva de gases de efeito estufa, a degradação da qualidade do ar, perdas econômicas, impactos sobre a saúde humana e o agravamento das mudanças climáticas [1]. Além de comprometer diretamente a qualidade do ar e o equilíbrio climático regional, as queimadas geram efeitos econômicos, sociais e ambientais de longo prazo, o que demanda estratégias eficientes de monitoramento, previsão e mitigação [2] [3][1].

Nesse cenário, o uso de dados ambientais provenientes de sensoriamento remoto tem se tornado essencial para o acompanhamento e a gestão de queimadas. Em especial, a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) disponibiliza uma ampla gama de dados meteorológicos e ambientais abertos, capturados por satélites como o *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) e o *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES-R), fundamentais para o monitoramento quase em tempo real de focos de calor, condições meteorológicas e padrões ambientais [4] [5]. A utilização desses dados tem se consolidado como uma estratégia indispensável para a mitigação de desastres e para o planejamento

de respostas rápidas. Esses dados oferecem informações em alta resolução espacial e temporal sobre parâmetros importantes, como focos de calor, umidade relativa, temperatura e direção dos ventos, permitindo a análise de padrões de risco e a construção de modelos preditivos robustos.

A transformação desses grandes volumes de dados em informações acessíveis e compreensíveis ocorre, principalmente, por meio de técnicas de visualização. Ferramentas como *dashboards* interativos, mapas de calor, sistemas de alerta e plataformas de análise espacial têm desempenhado um papel estratégico no suporte à tomada de decisão por pesquisadores, gestores públicos e comunidades afetadas [6]. Entretanto, apesar da crescente relevância dessas soluções, observa-se uma lacuna significativa na literatura quanto à avaliação sistemática de sua eficácia, usabilidade e aplicabilidade em diferentes contextos. Estudos pontuais demonstram o potencial de determinadas abordagens, mas carece de uma análise consolidada que permita comparar metodologias, identificar limitações comuns e propor boas práticas para o desenvolvimento de visualizações aplicadas a dados de queimadas.

Diante desse cenário, esta revisão sistemática tem como objetivo preencher essa lacuna, oferecendo uma análise abrangente e estruturada das principais técnicas de visualização de dados aplicadas ao monitoramento de queimadas, com base em dados da NOAA. Especificamente, este estudo busca: (i) mapear as técnicas de visualização mais utilizadas, identificando padrões de aplicação em diferentes contextos; (ii) avaliar criticamente a eficácia dessas ferramentas, considerando métricas como precisão, clareza, interatividade e adequação ao perfil dos usuários; e (iii) propor diretrizes para a representação visual de incertezas e para a integração de dados multivariados, como temperatura, umidade e vento, a partir de evidências consolidadas na literatura.

O escopo desta revisão concentra-se em estudos publicados que abordem aplicações práticas de visualização de dados de queimadas, com base em informações abertas da NOAA. São considerados artigos revisados por pares, em inglês ou português, que envolvam sistemas interativos, *dashboards*, ferramentas de alerta ou de análise espacial, desde que apresentem avaliações de desempenho, usabilidade ou impacto prático. Foram excluídos trabalhos teóricos sem validação empírica, revisões da literatura, *short papers* e estudos que não utilizem dados da NOAA como fonte principal. A ênfase recai sobre soluções replicáveis — ou seja, ferramentas e métodos cuja implementação possa ser reproduzida. Considera-se replicável qualquer solução que utilize dados abertos, apresente documentação clara, disponibilize seus procedimentos metodológicos de forma

transparente e permita a terceiros ou a adaptação da aplicação em diferentes contextos. Essa característica é necessária para garantir reprodutibilidade científica e ampliar a aplicabilidade prática das ferramentas — que tragam benefícios concretos para três públicos-alvo principais: pesquisadores, gestores ambientais e comunidades locais.

Ao consolidar o conhecimento existente, esta revisão não apenas oferece uma síntese crítica das melhores práticas de visualização de dados para o monitoramento de queimadas, como também contribui para o desenvolvimento de soluções mais robustas, inclusivas e orientadas à mitigação dos impactos crescentes dos incêndios florestais no contexto das mudanças climáticas globais.

Além de sintetizar o estado da arte, esta revisão oferece uma contribuição prática ao identificar como diferentes técnicas de visualização têm sido aplicadas no monitoramento e na previsão de queimadas utilizando dados da NOAA. Ao mapear abordagens, ferramentas e usos recorrentes, o estudo fornece subsídios para pesquisadores, desenvolvedores e gestores ambientais interessados em projetar aplicações eficazes, replicáveis e alinhadas às necessidades de análise e comunicação de risco

A estrutura do presente estudo está organizada em cinco seções principais. A seção atual que descreve a caracterização do estudo; a segunda seção que apresenta a metodologia adotada, descrevendo o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), os critérios de seleção e a estratégias de busca utilizada para identificar os estudos relevantes; a terceira seção reúne os resultados obtidos, destacando o conjunto de trabalhos incluídos, suas características e as evidências extraídas a partir da análise sistemática; na quarta seção, onde são feitas as discussões dos objetivos da pesquisa, apontando contribuições, limitações e oportunidades para pesquisas futuras; por fim na quinta seção do estudo são apresentadas as conclusões, sintetizando os principais resultados e refletindo sobre o potencial de aplicação das visualizações baseadas em dados da NOAA no monitoramento de queimadas.

## 2 Metodologia

Para garantir rigor, transparência e reprodutibilidade no processo de investigação, esta revisão sistemática seguiu as diretrizes do protocolo PRISMA, amplamente utilizado na condução de revisões na área científica [7]. A adoção dessa abordagem permite estruturar de forma criteriosa as etapas de busca, seleção, extração e análise dos dados, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos. Além disso, foram consideradas as recomendações metodológicas propostas por [8] para revisões sistemáticas, especialmente quanto à definição de critérios explícitos de inclusão e exclusão, ao uso de um protocolo estruturado para as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão, e à adoção de uma estratégia de busca reprodutível baseada em uma *string* formalizada. Também foram aplicadas orientações para a extração sistemática dos dados por meio de categorias predefinidas.

### 2.1 Estratégia de Busca

Este estudo foi conduzido por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), fundamentada nas diretrizes do protocolo PRISMA, que estabelece critérios rigorosos para garantir a transparência, reprodutibilidade e objetividade no processo de revisão.

A busca foi realizada exclusivamente na base *ScienceDirect*, selecionada por sua robustez e por sua ampla cobertura de publicações nas áreas de ciências ambientais, tecnologia e engenharia. Abrangendo mais de 2.500 periódicos e aproximadamente 40.000 livros acadêmicos, sendo a maior parte composta por artigos completos publicados em revistas de alto impacto, o que assegura a qualidade e a relevância do material analisado

A *string* inicial de busca passou por ajustes sucessivos. Observou-se que a referência explícita à NOAA nem sempre consta nos títulos, nas palavras-chave ou nos *abstracts* dos estudos, mesmo quando os trabalhos utilizam dados provenientes dessa instituição. Em muitos casos, os autores mencionam apenas os sensores (como VIIRS, GOES-R ou MODIS) ou os tipos de dados meteorológicos, sem citar diretamente a NOAA na descrição inicial do artigo. Diante disso, diferentes combinações de termos foram testadas até chegar a uma formulação capaz de recuperar estudos que realmente utilizam dados da NOAA.

A *string* final utilizada para a pesquisa foi a seguinte: ("*data visualization*" OR *infographic* OR *dashboard*) AND (*wildfire* OR "*forest fire*" OR "*natural fire*") AND (NOAA OR "*public datasets*") AND (*forecasting*)

Essa formulação mostrou-se a mais adequada, pois recuperou estudos que utilizam, explicitamente ou implicitamente, dados da NOAA, garantindo alinhamento ao escopo da revisão.

**Tabela 1: Critérios de Inclusão e Exclusão**

Inclusão	Exclusão
Artigos primários, revisados por pares	Artigos secundários, revisões de literatura ou estudos teóricos sem validação empírica
Publicados em inglês ou português	Short papers
Uso explícito de dados NOAA ou conjuntos públicos equivalentes	Estudos que não utilizam dados NOAA ou equivalentes
Apresentam técnicas de visualização aplicadas ao monitoramento, previsão ou alerta de queimadas	Trabalhos focados exclusivamente em modelagem preditiva sem visualização
Demonstração de aplicações práticas, como dashboards, mapas interativos ou sistemas de alerta	Artigos duplicados ou sem acesso ao texto completo

### 2.2 Seleção de Estudos

O processo de seleção seguiu quatro etapas principais (Figura 1): (i) Identificação: A aplicação da *string* na base *ScienceDirect* resultou em 79 artigos inicialmente recuperados; (ii) Triagem: Com a análise dos títulos e palavras-chave, 38 artigos foram selecionados por apresentarem aderência ao tema; (iii) Elegibilidade: Após a leitura dos resumos e *abstracts*, 9 artigos permaneceram na análise por atenderem aos critérios definidos; (iv) Inclusão: Por fim, após a leitura integral dos textos e análise criteriosa, 3 estudos atenderam integralmente aos critérios de inclusão e exclusão previamente definidos (Tabela 1), os quais consideram fatores como uso explícito de dados NOAA, presença de técnicas de visualização aplicadas ao monitoramento de queimadas e disponibilidade do texto completo.

Esses critérios orientaram a eliminação de trabalhos duplicados, *short papers*, revisões secundárias e estudos que não utilizam dados da NOAA como fonte primária.

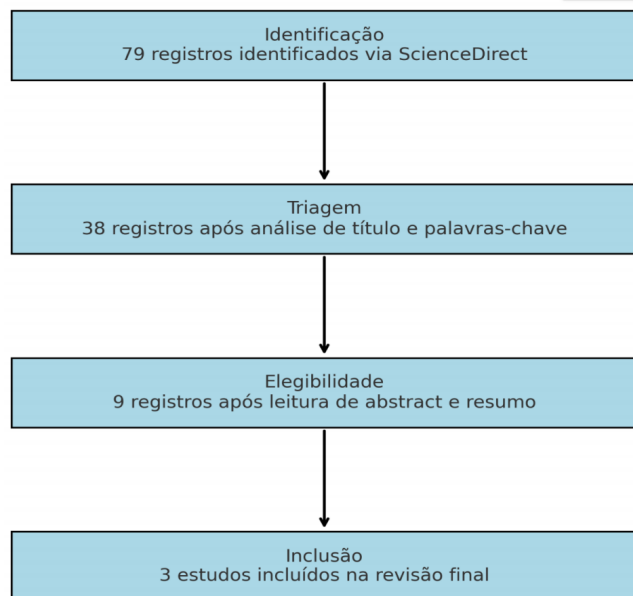


Figura 1: Fluxograma de Trabalho

Os dados extraídos foram organizados em uma tabela para análise qualitativa (Tabela 2), permitindo comparar as abordagens adotadas, suas limitações, vantagens e aderência às necessidades dos diferentes perfis de usuários no contexto do monitoramento de queimadas. A extração dos dados dos três artigos selecionados foi conduzida de forma padronizada, considerando as seguintes categorias:

Tabela 2: Análise Qualitativa

Categoria	Descrição
Metadados	Autores, ano de publicação, título, DOI
Aspectos da Visualização	Tipo de visualização (mapa, dashboard, gráfico, etc.), ferramentas utilizadas, nível de interatividade
Dados Utilizados	Fonte dos dados (NOAA ou equivalentes), resolução espacial e temporal, frequência de atualização
Aplicações	Contexto de uso (monitoramento, previsão, alerta), público-alvo (pesquisadores, gestores, comunidades)
Desempenho e Avaliação	Métricas usadas (precisão, clareza, usabilidade, tempo de resposta), limitações apontadas, pontos fortes
Relevância	Alinhamento com as questões de pesquisa e contribuição prática e/ou teórica

### 3 Resultados

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos a partir da análise dos três artigos selecionados, descrevendo as técnicas de visualização empregadas, os dados utilizados e os desafios ou limitações relatados.

#### 3.1 Caracterização Geral dos Estudos

Dos 79 artigos inicialmente identificados, apenas 3 [9, 10, 11] estudos atenderam integralmente aos critérios de inclusão. Cada estudo foca em uma aplicação específica de visualização de dados ambientais, com diferentes níveis de complexidade e públicos-alvo. Embora nem todos sejam direcionados exclusivamente ao monitoramento de queimadas, a parcialidade de suas pesquisas fornecia informações secundárias relevantes para o estudo realizado. Todos possuem interfaces, métodos e práticas replicáveis e aplicáveis a contextos de monitoramento de incêndios florestais, especialmente devido ao uso de dados meteorológicos e de satélites da NOAA, bem como de técnicas avançadas de visualização.

#### 3.2 Técnicas de Visualização Identificadas

A síntese qualitativa (Tabela 3) dos três estudos revelou abordagens complementares na utilização de dados da NOAA para a construção de ferramentas visuais.

- O estudo [9] apresenta um *framework* em R para acesso, processamento e visualização de grandes volumes de dados climáticos e meteorológicos, incluindo dados da NOAA. Embora não seja uma ferramenta de alerta direta, sua contribuição está na criação de pipelines reproduzíveis para a análise de séries temporais e a geração de mapas espaciais. As visualizações são altamente técnicas, voltadas a pesquisadores e desenvolvedores, utilizando gráficos interativos, mapas rasterizados e animações temporais
- O estudo [10] desenvolve uma plataforma web que permite o acesso, a análise e a visualização interativa de séries temporais hidrológicas e meteorológicas. A interface é centrada no usuário, com *dashboards*, gráficos de séries temporais, *boxplots* e mapas interativos, integrando dados da NOAA. Seu diferencial é permitir análises rápidas e visualizações intuitivas para a tomada de decisão na gestão de recursos naturais e de desastres ambientais.
- Por fim, o estudo [11] foca diretamente em incêndios, desenvolvendo uma plataforma que cruza dados de satélites da NOAA (como focos de calor e modelos de dispersão de fumaça) com informações demográficas e socioeconômicas. As visualizações incluem mapas interativos com camadas sobrepostas (queimadas, densidade populacional, áreas de risco) e sistemas de alerta para comunidades vulneráveis.

Todos os estudos empregam, em maior ou menor grau, *dashboards*, mapas interativos e gráficos de séries temporais como principais elementos visuais.

Tabela 3: Síntese dos Resultados

Estudo	Tipo de Visualização	Dados Utilizados	Público-alvo	Avaliação de Eficácia
[9]	Gráficos estatísticos, mapas raster, animações temporais	NOAA (meteorológicos e lógicos e satelitais)	Pesquisadores e desenvolvedores	Validação técnica, sem teste de usabilidade
[10]	Dashboard, gráficos de séries temporais, mapas interativos	NOAA (clima e hidrologia)	Pesquisadores e gestores	Validação técnica, com foco em estabilidade e precisão
[11]	Mapas interativos, sistema de alerta, camadas de risco	NOAA (focos de calor, meteorologia), dados demográficos	Comunidades, autoridades e gestores	Avaliação qualitativa por meio de <i>feedback</i> de usuários

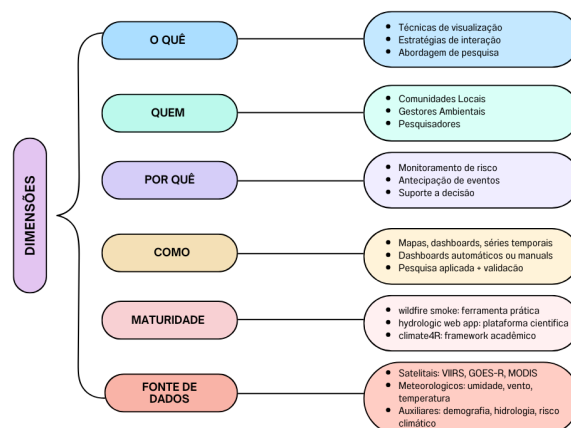


Figura 2: Dimensões

Na dimensão *O Quê*, foram identificadas diferentes abordagens de visualização, como *dashboards* interativos, mapas geoespaciais com múltiplas camadas de dados e gráficos de séries temporais, utilizados tanto para monitoramento quanto para emissão de alertas.

A dimensão *Quem* destacou três perfis de usuários: pesquisadores, que utilizam as ferramentas para análise de dados e desenvolvimento de modelos; gestores ambientais e autoridades, que se apoiam nas visualizações para a tomada de decisão; e, em alguns casos, comunidades locais, especialmente em sistemas de alerta relacionados à dispersão de fumaça.

Quanto à dimensão *Por Quê*, os objetivos centrais dos sistemas estão associados ao monitoramento do risco ambiental, ao suporte à tomada de decisão e à mitigação dos impactos das queimadas, principalmente na antecipação de eventos críticos.

Na dimensão *Como*, observa-se o uso de métodos variados, incluindo técnicas de visualização de dados, automação de *dashboards* e integração de modelos meteorológicos e climáticos. As estratégias vão desde *frameworks* técnicos, como o *climate4R* [9], até plataformas web com interfaces mais acessíveis, como no estudo focado em fumaça de queimadas.

A análise da dimensão *Maturidade* revela diferentes níveis de desenvolvimento: enquanto algumas ferramentas são *frameworks* de código aberto voltados ao meio acadêmico, outras estão mais próximas de aplicações práticas, com funcionalidades específicas para usuários não técnicos e para a geração de alertas em tempo real.

Por fim, na dimensão *Fonte de Dados*, todos os estudos dependem fortemente de dados abertos da NOAA, especialmente de sensores satelitais como VIIRS e GOES-R, além de variáveis meteorológicas e, em alguns casos, de dados demográficos e hidrológicos. A heterogeneidade e os desafios na integração desses dados foram apontados como limitações recorrentes.

Essa análise multidimensional permite não apenas mapear o estado atual das aplicações de visualização no contexto de monitoramento de queimadas, mas também identificar os principais desafios e oportunidades para avanços futuros na área

### 3.3 Dados Utilizados e Integração

Todos os estudos fazem uso extensivo de dados NOAA, destacando:

- Dados satelitais: VIIRS, GOES-R, MODIS (em alguns casos)
- Dados meteorológicos: precipitação, umidade, temperatura, direção e intensidade dos ventos
- Dados complementares: demográficos, socioeconômicos e hidrológicos, dependendo do objetivo do estudo

A integração desses dados ocorre por meio de *APIs*, acesso via *OPeNDAP* ou serviços *web*, sendo processados em ambientes como R, *Python* ou em *frameworks web* específicos.

### 3.4 Análise das Dimensões

Para uma compreensão mais abrangente das características dos estudos selecionados, esta revisão adotou uma análise baseada em seis dimensões principais: O Quê, Quem, Por Quê, Como, Maturidade e Fonte de Dados (*What, Who, Why, How, Maturity e Data Sources*), baseada na taxonomia apresentada em [12]

### 3.5 Avaliação da Eficácia das Visualizações

Entre os estudos analisados, apenas o trabalho voltado ao monitoramento de populações em risco devido à fumaça de queimadas [11] realizou uma avaliação estruturada da eficácia da própria plataforma. Essa avaliação foi conduzida por meio da coleta de *feedback* de usuários, contemplando aspectos como a clareza das informações, a utilidade das visualizações e a acessibilidade da interface. Os resultados indicaram que a plataforma possui boa aceitação entre os usuários finais, principalmente devido à simplicidade na apresentação dos dados e à capacidade de gerar alertas direcionados a comunidades vulneráveis.

Por outro lado, os estudos [9, 10] concentraram suas validações na robustez técnica dos sistemas desenvolvidos, priorizando a precisão dos dados processados, a estabilidade operacional e a confiabilidade na manipulação de grandes volumes de dados. Entretanto, esses trabalhos não realizaram avaliações formais relacionadas à usabilidade, à compreensão ou ao impacto das visualizações no processo de tomada de decisão por parte dos usuários.

De forma geral, uma limitação observada em todos os estudos refere-se à ausência de métricas objetivas que permitam avaliar a eficácia das visualizações no apoio à compreensão dos dados, na facilitação da tomada de decisão e na comunicação eficiente dos riscos. Essa lacuna torna-se ainda mais relevante quando se considera a necessidade de atender a públicos não especializados, como gestores locais, comunidades afetadas e agentes de resposta rápida.

### 3.6 Desafios Relatados nos Estudos

A análise dos três estudos permitiu identificar um conjunto de limitações e desafios técnicos e operacionais recorrentes. Um dos principais obstáculos refere-se à integração de dados heterogêneos, que apresentam diferenças significativas de resolução temporal e espacial, além de lacunas de disponibilidade de dados e formatos incompatíveis entre diferentes fontes. Esse problema impacta diretamente a consistência e a confiabilidade das visualizações produzidas. Outro desafio relevante é a falta de padronização na comunicação das incertezas associadas aos dados e às previsões, especialmente no que diz respeito às informações meteorológicas e à dispersão de fumaça proveniente de queimadas. A ausência de representações visuais claras das margens de erro e dos níveis de confiabilidade pode comprometer a interpretação adequada dos dados pelos usuários. Adicionalmente, verifica-se uma baixa preocupação com a avaliação da usabilidade nas soluções desenvolvidas, sobretudo nos estudos que não foram concebidos para atender públicos leigos ou com pouca familiaridade com ferramentas de análise de dados. Essa limitação é particularmente evidente no caso do *framework climate4R*, cuja complexidade técnica exige conhecimentos avançados em linguagens de programação e análise estatística, restringindo seu uso a perfis altamente especializados e dificultando sua adoção por gestores ambientais ou por comunidades locais.

## 4 Discussão

Os resultados desta revisão sistemática revelam lacunas significativas na aplicação de técnicas de visualização de dados para o monitoramento de queimadas, especialmente quando se utilizam dados da NOAA. Dos objetivos propostos no início desta pesquisa.

O primeiro objetivo da presente pesquisa consistia em mapear as técnicas de visualização mais utilizadas em aplicações que empregam dados da NOAA para o monitoramento de queimadas. Entretanto, devido ao número reduzido de estudos elegíveis, apenas 3 trabalhos atenderam aos critérios estabelecidos, não sendo possível identificar padrões coerentes nem tendências no uso dessas técnicas. Apesar de cada estudo analisado apresentar visualizações relevantes em seus contextos individuais, o conjunto limitado de evidências impossibilitou a caracterização de categorias recorrentes ou o estabelecimento de uma perspectiva ampla das abordagens utilizadas. Deste modo o mapeamento resultou em observações pontuais, porém insuficientes para a abranger uma sistematização.

O segundo objetivo visava avaliar criticamente a eficácia das ferramentas identificadas considerando aspectos como clareza, interatividade, precisão e adequação aos usuários. Nesse caso, os resultados foram mais conclusivos: os estudos incluídos demonstraram que as aplicações baseadas em dados da NOAA são, em geral, visualmente claras, tecnicamente consistentes e reproduzíveis. A estrutura das ferramentas e o uso transparente dos dados contribuíram para uma interpretação eficiente, além de apresentarem potencial de adaptação a diferentes contextos analíticos. Mesmo sem métricas quantitativas comparativas, foi possível reconhecer que as soluções analisadas atendem satisfatoriamente às necessidades para as quais foram projetadas.

E por fim, o terceiro objetivo buscava propor diretrizes para a representação visual de incertezas e para a integração de variáveis multivariadas, como vento, umidade e temperatura. No entanto, os resultados encontrados não discutiam explicitamente técnicas de visualização de incertezas, nem apresentavam abordagens sólidas para a integração de múltiplas variáveis ambientais a partir de dados da NOAA. A ausência de fundamentação teórica e prática nessas dimensões impediu o desenvolvimento de recomendações sustentadas pela literatura, evidenciando uma lacuna importante que pode orientar estudos futuros

### 4.1 Comparação com a Literatura Existente

Ao comparar os resultados desta revisão com a literatura mais ampla sobre visualização de dados ambientais, observa-se um alinhamento com desafios já reportados em outros contextos. Estudos como os de [13] e [14] destacam que a integração de dados multissensores, especialmente aqueles provenientes de satélites, enfrenta dificuldades relacionadas a diferenças de resolução espacial, temporal e à variabilidade na frequência de atualização dos dados — desafios igualmente identificados nos três estudos analisados nesta revisão.

Além disso, a ausência de uma abordagem padronizada para a representação de incertezas nas visualizações é frequentemente discutida na literatura [15][16]. Isso se reflete diretamente nos estudos analisados, que, embora tragam ferramentas robustas em termos de acesso e processamento de dados, pouco avançam na comunicação clara das margens de erro e na visualização das incertezas associadas aos dados meteorológicos e de queimadas.

Quando comparado a revisões anteriores em campos correlatos, como visualização de riscos hidrológicos ou climáticos, nota-se que o problema da baixa avaliação da eficácia das visualizações também é recorrente. Tal como relatado por [17], muitos sistemas priorizam o desenvolvimento técnico, mas não realizam testes suficientes de

usabilidade, compreensão da informação ou impacto nas decisões dos usuários finais. A análise realizada nesta revisão reforça esse padrão, especialmente nos estudos [9, 10], que não contemplam avaliações formais junto aos usuários.

Por outro lado, observa-se um avanço específico no estudo voltado ao monitoramento de riscos à saúde relacionados à fumaça de queimadas, que incorpora aspectos de acessibilidade, compreensão para públicos leigos e geração de alertas específicos — uma prática que vem sendo cada vez mais discutida como essencial na literatura recente sobre ciência de dados aplicada a desastres [18].

## 4.2 Implicações Práticas

Os resultados desta revisão têm implicações práticas diretas para o desenvolvimento de ferramentas mais eficazes para o monitoramento de queimadas. Primeiramente, a carência de visualizações que comuniquem adequadamente as incertezas e os níveis de risco sugere a necessidade urgente de desenvolver padrões visuais claros e consistentes, capazes de traduzir a complexidade dos dados meteorológicos e satelitais em informações compreensíveis e acionáveis.

Além disso, a dificuldade na integração de dados de diferentes fontes reforça a importância de *frameworks* abertos e interoperáveis, capazes de facilitar o cruzamento de informações provenientes de múltiplos sensores, modelos climáticos e bases demográficas. Ferramentas como o *climate4R* [9], embora robustas, ainda precisam ser adaptadas ou acompanhadas de interfaces mais intuitivas, para que possam ser utilizadas não apenas por pesquisadores, mas também por gestores ambientais, defesa civil e comunidades locais.

O desenvolvimento de sistemas com foco em públicos diversos, como evidenciado no estudo sobre fumaça de queimadas, demonstra que é possível construir interfaces acessíveis que auxiliem na disseminação de informações críticas em tempo real. Tais práticas devem ser incentivadas, especialmente em um contexto de aumento dos eventos extremos associados às mudanças climáticas, em que a comunicação eficiente do risco torna-se uma questão de segurança pública e de proteção ambiental.

Por fim, os resultados indicam que futuras iniciativas de desenvolvimento de visualizações aplicadas ao monitoramento de queimadas devem incorporar processos participativos, envolvendo, desde o início, os usuários finais na construção das interfaces e na definição das necessidades informacionais. Além disso, é fundamental que os projetos incluam etapas sistemáticas de avaliação de eficácia, considerando tanto métricas objetivas (precisão, clareza, tempo de resposta) quanto percepções subjetivas dos usuários quanto à utilidade e à compreensibilidade das visualizações produzidas.

## 5 Conclusões

Esta revisão sistemática da literatura teve como objetivo mapear, avaliar e sintetizar as principais técnicas de visualização de dados aplicadas ao monitoramento de queimadas, com base em dados provenientes da NOAA. A análise dos três estudos selecionados revelou os avanços no desenvolvimento de ferramentas que integram dados meteorológicos, satelitais e socioambientais, embora também tenha evidenciado desafios significativos ainda presentes na área.

Os resultados apontam que, embora existam soluções tecnológicas robustas no que diz respeito ao acesso e ao processamento de grandes volumes de dados ambientais, há uma lacuna notável

na avaliação da eficácia das visualizações, especialmente quanto à sua clareza, usabilidade e capacidade de apoiar a tomada de decisão por diferentes perfis de usuários. Além disso, questões como a dificuldade na integração de dados heterogêneos e a ausência de estratégias consistentes para a comunicação de incertezas continuam sendo desafios recorrentes.

Em termos práticos, esta revisão destaca a necessidade de desenvolver interfaces mais acessíveis e intuitivas, capazes de transformar dados complexos em informações compreensíveis e úteis tanto para pesquisadores e gestores ambientais quanto para comunidades vulneráveis aos impactos dos incêndios florestais. A adoção de práticas participativas, que envolvam os usuários desde as fases iniciais do desenvolvimento das ferramentas, bem como a implementação de avaliações sistemáticas de eficácia, são estratégias fundamentais para o aprimoramento das soluções existentes.

Entre as limitações desta revisão, destaca-se o número reduzido de estudos que atenderam aos critérios de inclusão, o que reflete tanto a especificidade da abordagem adotada quanto uma possível lacuna na própria literatura sobre o tema. Além disso, é importante ressaltar que a generalização dos resultados deste estudo pode ser limitada pelo viés de seleção inerente à pequena amostra de estudos analisados (n=3) e pela restrição a uma única base de dados (*ScienceDirect*). Embora os trabalhos selecionados representem contribuições relevantes, é plausível que abordagens inovadoras — como ferramentas baseadas em inteligência artificial ou plataformas regionais não indexadas — tenham ficado de fora do escopo, o que demanda cautela na extrapolação dos resultados.

## 5.1 Interpretação dos resultados

Para contornar essas limitações e fomentar avanços na área, propõem-se diretrizes práticas baseadas nas lacunas identificadas: (i) a comunicação de incertezas deve incorporar elementos visuais padronizados, como legendas dinâmicas que quantifiquem margens de erro e mapas de calor com transparência ajustável para variáveis meteorológicas; (ii) o design das interfaces precisa priorizar acessibilidade, empregando paletas de cores intuitivas (ex.: vermelho para alertas críticos, com testes de compatibilidade para daltônicos) e recursos como *tooltips* explicativos para termos técnicos; e (iii) a integração de dados heterogêneos exige o desenvolvimento de pipelines automatizados, capazes de harmonizar informações de satélites NOAA com dados socioeconômicos em tempo real. Essas diretrizes, quando adotadas em conjunto com avaliações sistemáticas de usabilidade, podem mitigar desafios recorrentes e ampliar o impacto prático das ferramentas.

Para pesquisas futuras, recomenda-se ampliar o escopo das buscas para outras bases de dados e explorar abordagens que combinem métodos quantitativos e qualitativos na avaliação das visualizações. Além disso, é essencial que os desenvolvedores de ferramentas de monitoramento de queimadas avancem na criação de representações visuais que comuniquem não apenas os dados, mas também suas incertezas e implicações, contribuindo de forma efetiva para a mitigação dos impactos ambientais e sociais dos incêndios florestais.

## Referências

- [1] David MJ S Bowman, Francisco Moreira e Crystal A Kolden. "Fire in the Earth System". Em: *Science* 377.6607 (2022), eabl7722. doi: 10.1126/science.1163886.

- [2] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Rel. téc. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [3] John T Abatzoglou, A Park Williams e Renaud Barbero. "Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices". Em: *Environmental Research Letters* 14.12 (2019), p. 124057. doi: [10.1029/2018GL080959](https://doi.org/10.1029/2018GL080959).
- [4] S Schollaert Uz et al. "NASA and NOAA satellite data in support of environmental decision-making". Em: *Environmental Modelling & Software* 130 (2020), p. 104716. doi: [10.1016/j.envsoft.2020.104716](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104716).
- [5] Hai Zhang et al. "Near-real-time global biomass burning emissions product from GOES satellites". Em: *Remote Sensing of Environment* 232 (2019), p. 111278. doi: [10.1029/2012JD017459](https://doi.org/10.1029/2012JD017459).
- [6] Gennady Andrienko et al. "Visual analytics for understanding spatial patterns of wildfire risk". Em: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 23.1 (2017), pp. 251–260. doi: [10.1007/s13218-012-0177-4](https://doi.org/10.1007/s13218-012-0177-4).
- [7] Matthew J Page et al. "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews". Em: *BMJ* 372 (2021), n71. doi: [10.1136/bmj.n71](https://doi.org/10.1136/bmj.n71).
- [8] Barbara Kitchenham e Stuart Charters. *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering*. Rel. téc. Keele University, 2007. URL: [https://www.elsevier.com/\\_data/promis\\_misc/525444systematicreviewsguide.pdf](https://www.elsevier.com/_data/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf).
- [9] M Iturbide et al. "The R-based climate4R open framework for reproducible climate data access and post-processing". Em: *Environmental Modelling & Software* 111 (2019), pp. 42–54. doi: [10.1016/j.envsoft.2018.09.009](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.009).
- [10] Conrad E Brendel, Randel L Dymond e Marcus F Aguilar. "An interactive web app for retrieval, visualization, and analysis of hydrologic and meteorological time series data". Em: *Environmental Modelling & Software* 117 (2019), pp. 14–28. doi: [10.1016/j.envsoft.2019.03.003](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.03.003).
- [11] Ambarish Vaidyanathan, Fuyuen Yip e Paul Garbe. "Developing an online tool for identifying at-risk populations to wildfire smoke hazards". Em: *Science of The Total Environment* 619-620 (2018), pp. 376–383. doi: [10.1016/j.scitotenv.2017.10.270](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.270).
- [12] Cristian Cechinel et al. "Mapping Learning Analytics initiatives in Latin America: A systematic review and research agenda". Em: *British Journal of Educational Technology* 51.4 (2020), pp. 973–998. doi: [10.1111/bjet.12941](https://doi.org/10.1111/bjet.12941).
- [13] N.B. Blum et al. "Analyzing Spatial Variations of Cloud Attenuation by a Network of All-Sky Imagers". Em: *Remote Sensing* 14.10 (2022), p. 2458. doi: [10.3390/rs14225685](https://doi.org/10.3390/rs14225685).
- [14] X. Ma et al. "A Comprehensive Review of Multi-Source Data Fusion Processing Methods". Em: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 13 (2025), p. 1485. doi: [10.20944/preprints202503.1108.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202503.1108.v1).
- [15] Lace M Padilla, Ian T Ruginski e Sarah H Creem-Regehr. "Effects of ensemble and summary displays on interpretations of geospatial uncertainty data". Em: *Cognitive Research: Principles and Implications* 5.1 (2020), pp. 1–16. doi: [10.1186/s41235-017-0076-1](https://doi.org/10.1186/s41235-017-0076-1).
- [16] Alan M MacEachren et al. "Visualizing geospatial information uncertainty: What we know and what we need to know". Em: *Cartography and Geographic Information Science* 32.3 (2018), pp. 139–160. doi: [10.1559/1523040054738936](https://doi.org/10.1559/1523040054738936).
- [17] Julie Wilk et al. "The usability of climate information for water management in semi-arid regions: Current status and future directions". Em: *Climate Services* 15 (2019), p. 100101. doi: [10.1016/j.cliser.2019.100101](https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100101).
- [18] Qian Cao et al. "Enhancing community resilience to wildfire smoke through data-driven early warning systems: A review of tools and challenges". Em: *Environmental Research* 216 (2023), p. 114766. doi: [10.1016/j.envres.2022.114766](https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114766).

Received 20 February 2007; revised 12 March 2009; accepted 5 June 2009