

Detecção de Incêndios Florestais Baseado em Outlier e Amostragem Adaptativa em Redes de Sensores Sem Fio

Adevan Neves Santos, Italo Thiago Felix dos Santos e Edgard Luciano Oliveira da Silva

Resumo— Este trabalho propõe um método de detecção de incêndios em redes de sensores sem fio baseado em análise espaço-temporal de outliers e amostragem adaptativa. A abordagem é avaliada em um ambiente de simulação controlado para monitoramento de incêndios florestais, considerando diferentes frequências de ocorrência de eventos. Os resultados demonstram que o método é capaz de reduzir o volume de comunicação intra-cluster em até 41% e aumentar a vida útil da rede em aproximadamente 19,5 vezes em cenários sem eventos. Em cenários com incêndios, a proposta apresenta um ganho médio de 13,7% em eficiência energética e redução de 9,7% no tráfego, com perda média de detecção limitada a 6,7 pontos percentuais em relação a abordagens baseadas em limiar. Esses resultados evidenciam que a integração entre detecção espaço-temporal e controle adaptativo de amostragem permite um equilíbrio eficiente entre precisão de detecção e consumo energético em aplicações de monitoramento ambiental.

Palavras-Chave— Redes de sensores sem fio, detecção de eventos, incêndios florestais.

Abstract— This work proposes a fire detection method for wireless sensor networks based on spatio-temporal outlier analysis and adaptive sampling. The approach is evaluated in a controlled simulation environment for forest fire monitoring, considering different event occurrence frequencies. The results demonstrate that the method can reduce intra-cluster communication volume by up to 41% and increase network lifetime by approximately 19.5 times in scenarios without events. In fire scenarios, the proposed approach achieves an average energy efficiency gain of 13.7% and a reduction of 9.7% in communication traffic, with an average detection loss limited to 6.7 percentage points compared to threshold-based approaches. These results indicate that integrating spatio-temporal detection with adaptive sampling control enables an effective balance between detection accuracy and energy consumption in environmental monitoring applications.

Keywords— Wireless sensor networks, event detection, forest fire monitoring.

I. INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica é um dos principais biomas do planeta e desempenha um papel importante na conservação da biodiversidade. Ocupando nove estados brasileiros, sua extensão corresponde a quase 60% da área do país, com cerca de 5 milhões de km² [1]. Entretanto, nos últimos anos, a floresta foi submetida a pressões de atividades antrópicas,

como o desmatamento, a expansão agrícola e os incêndios florestais. Dados recentes demonstram aumento de 8,4% no desmatamento entre agosto de 2024 a junho de 2025, correspondendo a 960 km² de área devastada, situação impulsionada por queimadas [2]. Os incêndios florestais são eventos de propagação descontrolada de fogo em regiões de vegetação natural, cujo impacto ambiental é alto.

Diante desse cenário, o uso de tecnologias de monitoramento ambiental apresenta-se como uma abordagem promissora para identificar tais eventos. Neste trabalho são utilizadas as **Redes de Sensores sem Fio** (RSSF), ao permitirem a coleta de dados locais e menor latência na detecção de eventos. Porém, esses sistemas operam sob restrições de energia, dado que a bateria de um sensor deve durar dias sem precisar de manutenção, sendo a transmissão contínua de dados o principal gasto energético.

Nesse contexto, diferentes propostas para a detecção de eventos em RSSF buscam conciliar precisão, cobertura e consumo energético. Uma delas integra sensores em solo a um drone com gateway, ampliando o alcance do sistema [3]. Outra utiliza coprocessadores de ultrabaixo consumo para o sensoriamento, LoRaWAN para os alertas e uma rede neural em drone para confirmar focos suspeitos [4]. Em outra direção, drones com múltiplos sensores e modelos de aprendizado de máquina coletam dados ambientais em alta resolução para estimar o risco de incêndio [5].

A pesquisa feita em [6] propõe o sistema *EcoSentry*, que utiliza uma abordagem em múltiplos critérios para detecção de eventos, combinando variáveis ambientais e cálculo de média ponderada, resultando em um índice de risco de incêndios. Apesar de fornecer um método robusto em comparação a limiares simples, a pesquisa não avalia o consumo energético da rede, nem considera cenários (reais ou simulados) de incêndio em regiões abertas.

Adicionalmente, o trabalho de [7] propõe a detecção de incêndios utilizando sensores de temperatura, umidade e gases combustíveis. A solução emprega comunicação de longo alcance via LoRa e envio de alertas por módulos GSM, permitindo a notificação para autoridades locais. A decisão de evento é baseada em valores pré-definidos, onde o envio de mensagem só ocorre depois do limiar ser atingido. Embora a abordagem seja eficiente em energia, ela se limita a valores fixos e não explora a correlação espacial e temporal entre as leituras dos sensores.

Além da detecção, outra preocupação é a otimização da comunicação na rede de sensores. Abordagens baseadas no

algoritmo LEACH utilizam técnicas de organização hierárquica por clusters para reduzir o custo de comunicação. O trabalho de [8] propõe uma melhoria no método original chamada LEACH-EKN, que aprimora a eleição de *cluster heads* considerando fatores como energia residual dos nós, densidade local e distribuição ótima de grupos. Os autores incorporam um modelo de fusão de dados baseado em predição que reduz transmissões redundantes e controla erro de estimativa. Entretanto, embora suas vantagens, a abordagem não considera adaptação do comportamento da rede em função da ocorrência de eventos, mantendo o mesmo padrão de operação em cenários sem atividade suspeita, o que pode resultar em consumo ineficiente. Neste trabalho, o seu modelo de rede e consumo energético foram adotados como base para a simulação.

A modelagem de eventos neste trabalho combina evidências experimentais e uma representação matemática dos efeitos do fogo. Nos experimentos apresentados por [9], o CO_2 apresentou picos após a ignição mesmo a 30 m da fonte, enquanto a temperatura e a umidade relativa do ar não mostraram alterações evidentes sob o fogo, mesmo em sensores posicionados a 10 m. Esse contraste sugere uma dependência implícita tanto da variável monitorada quanto da distância até a frente de fogo. Por esse motivo, a simulação adota uma função inspirada em [10], na qual a influência da chama é representada por uma distribuição Gaussiana, cuja intensidade decai com a distância e cuja dispersão depende das características do fogo.

Diante dessas limitações, este trabalho propõe um método de detecção de eventos em RSSF baseado em análise espaço-temporal de *outliers* integrado a uma amostragem adaptativa ao nível de *cluster*. Diferentemente das abordagens existentes, a proposta utiliza a detecção como o controle dinâmico da comunicação, permitindo que a rede opere em estados de baixo consumo na ausência de eventos e aumente a taxa de amostragem apenas quando há indícios de eventos. Além disso, a abordagem considera a correlação espacial e temporal entre as leituras dos sensores.

Para a etapa de avaliação, foi desenvolvido um ambiente de simulação no software Network Simulator [11], permitindo a comparação com outros algoritmos. Os resultados demonstram que o método proposto mantém desempenho competitivo na detecção de eventos, ao mesmo tempo em que reduz o volume de comunicação e melhora a eficiência energética da rede.

Este artigo é organizado da seguinte forma: Seção II descreve o método proposto e o protocolo experimental; Seção III descreve os resultados da simulação e Seção IV conclui o trabalho e direciona a pesquisa para trabalhos futuros.

II. MÉTODO

Nesta seção, são descritos o modelo de simulação adotado, o algoritmo de detecção proposto e o protocolo experimental utilizado na avaliação. Inicialmente, apresenta-se a modelagem do cenário de incêndio, seguida pelo funcionamento do método de detecção e, por fim, os cenários simulados e métricas consideradas para análise de desempenho.

A. Modelagem do Cenário de Fogo

Conforme apresentado em [9], as ignições produzem alterações no ambiente monitorado, com aumentos abruptos nas concentrações de gases como o CO_2 e valores mais localizados de temperatura e umidade do ar. Ao contrário de trabalhos cujo modelo representa a propagação por estados discretos, como área não queimada e em combustão, sendo o único parâmetro de avaliação o tempo de detecção [12], este trabalho modela diretamente a leitura de sensores (elemento nó da RSSF). Para isso, a solução proposta considera o CO_2 , capaz de indicar o evento mesmo em maiores distâncias, e as variáveis de temperatura e umidade do ar, ao possuírem efeitos mais próximos à chama. Esse comportamento é esperado, pois gases se dispersam rapidamente no ambiente.

Com base nessas observações, a simulação modela as três variáveis ambientais. Cada variável é composta por um valor base (μ), um termo espacial dependente da posição do sensor, e um componente temporal modelado por um processo autoregressivo AR(1), permitindo representar flutuações naturais do ambiente. Eventos de incêndio possuem instantes de início e localização, e afetam as variáveis de forma distinta: o CO_2 apresenta resposta intensa e com maior alcance espacial, enquanto temperatura e umidade sofrem poucas alterações.

Formalmente, a leitura de uma variável ambiental $v \in \{CO_2, Temp, Hum\}$ no nó i e instante discreto k é definida como:

$$v_i(k) = \mu_v + b_i^v + g_v(k) + l_i^v(k) + E_i^v(k) \quad (1)$$

onde μ_v representa o valor médio da variável, b_i^v é o viés espacial associado à posição do sensor, $g_v(k)$ é o componente global lento modelado por AR(1), $l_i^v(k)$ representa o ruído temporal local do nó, e $E_i^v(k)$ corresponde ao efeito do evento de incêndio. Este último é definido como:

$$E_i^v(k) = \alpha_v \cdot w_v(d_i) \cdot P(k - k_0) \quad (2)$$

em que α_v controla a intensidade da variável, $w_v(d_i)$ é a função de decaimento espacial em função da distância d_i ao ponto de ignição, e $P(\cdot)$ representa um pulso temporal assimétrico com subida rápida e decaimento lento. Para o CO_2 , utiliza-se um decaimento exponencial, enquanto temperatura e umidade utilizam funções com maior atenuação espacial, refletindo seu comportamento mais localizado.

Para exemplificar, a Figura 1 apresenta a evolução da temperatura em torno de um evento de ignição no round 20. Observa-se que a média da rede se mantém, enquanto o nó mais próximo ao foco do incêndio registra um aumento acentuado seguido de decaimento gradual.

B. Algoritmo de Detecção de Evento

A detecção de eventos está distribuída e organizada em ciclos de comunicação (*rounds*). Inicialmente, os nós sensores são agrupados em clusters por meio do algoritmo LEACH-EKN, conforme descrito em [8]. Em cada round, os nós coletam amostras e as enviam ao *cluster head*, que executa o método de detecção. O número de amostras coletadas por *round* é adaptativo: em condições normais, a rede opera

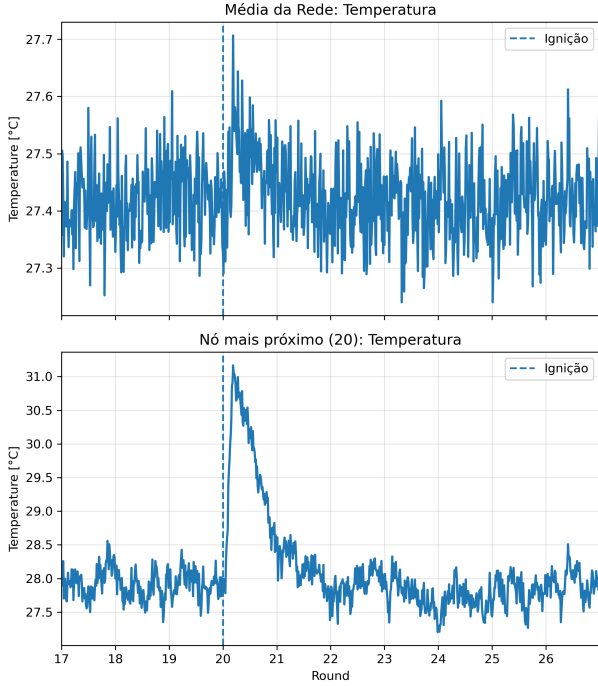


Fig. 1. Dados da simulação de fogo na rede de sensores.

com um número mínimo de amostras (cinco), reduzindo o consumo energético. Quando o detector identifica outlier, a taxa de amostragem é aumentada no round subsequente para melhorar a confiabilidade da detecção. Caso o evento não seja confirmado, a taxa é gradualmente reduzida pela metade, retornando ao estado de baixo consumo.

O algoritmo é executado no nível do *cluster head* e ocorre em duas etapas. Na primeira, cada nó é avaliado a partir de um histórico deslizante de 10 medições. Para cada variável (CO_2 , temperatura e umidade), são calculados scores normalizados (Z-score), que medem o desvio da leitura atual em relação ao comportamento histórico do nó. Um nó é classificado como suspeito quando apresenta evidência de aumento de CO_2 ($Z_{CO_2} \geq 3.0$) ou aumento moderado ($Z_{CO_2} \geq 2.0$) acompanhado por confirmação em temperatura ($Z_{Temp} \geq 1.5$) ou queda de umidade ($Z_{Hum} \geq 1.5$), pois é o padrão físico esperado. Para reduzir o impacto de ruídos isolados, exige-se que uma fração mínima de nós avaliados apresente comportamento suspeito. Neste trabalho, é definida empiricamente como 30%, sendo tratada como um parâmetro ajustável do método. Seu valor busca conciliar a evidência coletiva sem se tornar excessivamente restritiva para eventos localizados.

Na segunda etapa, é realizada uma validação coletiva no nível do cluster, explorando a correlação espacial das medições. Um evento é confirmado quando há consistência entre múltiplos nós, sendo exigida a mesma proporção mínima de confirmações. Além disso, a assinatura média do cluster deve apresentar predominância de CO_2 ($Z_{CO_2}^{mean} \geq 1.2$), acompanhada por variações coerentes em temperatura ($Z_{Temp}^{mean} \geq 1.0$) ou umidade ($Z_{Hum}^{mean} \geq 1.0$). Esses critérios garantem que a decisão final considere tanto a anomalia individual quanto sua consistência espaçotemporal na rede.

C. Cenários simulados e Métricas

Os cenários simulados foram construídos a partir de uma configuração controlada da rede de sensores, utilizando o módulo de simulação desenvolvido neste trabalho. A rede é composta por 100 nós distribuídos uniformemente em uma área de 100×100 m, com estação base posicionada no centro da região. Cada execução considera possui um limite máximo de rounds, com especificação de máximo de amostras por round, sendo a posição dos nós e a geração dos eventos controladas por uma *seed* conhecida. Os eventos de incêndio são inseridos dinamicamente ao longo da simulação, a partir de um round inicial e distribuídos espacialmente de forma aleatória. Para cada cenário, é gerado um conjunto completo de dados ambientais previamente à execução da rede, garantindo que todos os algoritmos sejam avaliados sobre o mesmo conjunto de entradas.

O primeiro cenário exibe o comportamento da rede na ausência de eventos de incêndio, permitindo avaliar o impacto do controle adaptativo da taxa de amostragem no consumo energético. Nesse contexto, a principal métrica de interesse é o volume de comunicação ao longo do tempo, medido pela quantidade de pacotes intra-cluster e inter-cluster por round. Também é avaliada a sobrevivência da rede por meio das métricas FND (*First Node Dead*), HND (*Half Nodes Dead*) e LND (*Last Node Dead*), que representam, respectivamente, o round em que o primeiro nó esgota sua energia, o momento em que 50% dos nós da rede estão inoperantes e o ponto em que todos os nós deixam de funcionar. Essas métricas caracterizam o impacto do consumo energético ao longo do tempo.

O segundo cenário avalia o desempenho dos algoritmos de detecção na ocorrência de incêndio. Para isso, foi definido um experimento no qual eventos são inseridos a partir de um round inicial fixo e repetidos periodicamente ao longo da simulação, variando-se o intervalo entre eventos. Foram considerados intervalos de 10, 8, 6, 4 e 2 rounds, permitindo analisar a rede em cenários esparsos e situações com alta frequência. Em todas as execuções, a distribuição espacial dos nós, os parâmetros da rede e o conjunto de eventos gerados foram mantidos idênticos entre os algoritmos, garantindo uma comparação justa. A avaliação considera simultaneamente métricas de detecção e eficiência energética. Do ponto de vista de detecção, são analisados o número total de eventos gerados e a quantidade de eventos corretamente identificados, permitindo estimar a taxa de acerto dos algoritmos. Em termos de eficiência, são utilizadas métricas de energia residual ao final da simulação e o volume total de comunicação intra-cluster, que representa o principal custo energético da rede. Dessa forma, o cenário permite caracterizar o compromisso entre precisão de detecção e consumo de recursos.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos cenários simulados em termos de consumo energético, volume de comunicação e desempenho na detecção de eventos. Os experimentos foram estruturados para avaliar o algoritmo de detecção e a política de amostragem do método proposto.

Comparação do tempo de vida da rede (FND, HND, LND)

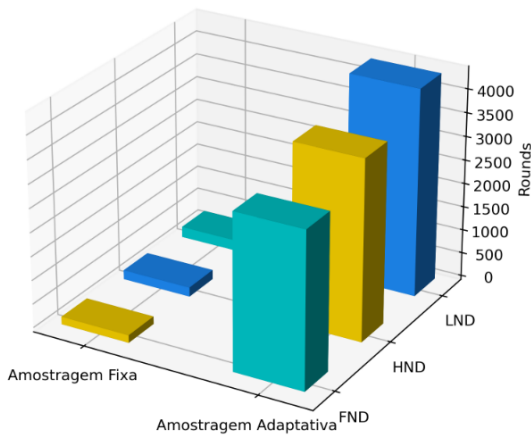


Fig. 2. Cenário 1 sem evento: Amostragem fixa e adaptativa.

No primeiro cenário, a rede opera na ausência de eventos de incêndio. Conforme ilustrado na Figura 2, observa-se que a abordagem adaptativa reduz o volume de comunicação intra-cluster em aproximadamente 41%, mantendo a rede em um estado de baixo consumo na maior parte da simulação. Como consequência, há um aumento expressivo na vida útil da rede: enquanto o modelo base com amostragem fixa atinge o último round (LND) em 225, a abordagem adaptativa estende esse limite para 4379 rounds, representando um aumento de aproximadamente 19,5 vezes na longevidade da rede.

No segundo cenário, observa-se inicialmente que o método EcoSentry apresenta comportamento instável, indicando eventos em praticamente todos os rounds, o que evidencia a fragilidade do índice de risco adotado, por não considerar explicitamente variações temporais nas medições. Em contraste, tanto o método baseado em limiar quanto a abordagem proposta incorporam mecanismos de detecção sensíveis a mudanças nos dados, evitando disparos causados por pequenas oscilações do ambiente.

Em média, a abordagem proposta apresenta uma redução de 6,72 pontos percentuais na taxa de detecção, ao passo que obtém um ganho médio de energia de 13,74% e uma redução de 9,74% no volume de pacotes intra-cluster comparado ao método com threshold. Observa-se que, para cenários com menor frequência de eventos (e.g., intervalos de 10 e 8 rounds), a perda de detecção é praticamente inexistente ou reduzida, mantendo desempenho equivalente ao limiar. No entanto, à medida que a frequência de eventos aumenta (intervalos de 4 e 2 rounds), há uma degradação progressiva da taxa de detecção, associada ao aumento da variabilidade das medições e maior incidência de ruídos no sistema.

Esse comportamento também impacta ambos os métodos analisados, uma vez que a maior frequência de eventos reduz a separabilidade entre estados normais e de incêndio, dificultando a identificação de padrões consistentes. Ainda assim, o método proposto mantém ganhos expressivos em eficiência energética, especialmente em cenários mais críticos, como no intervalo de 2 rounds, onde o aumento na energia residual

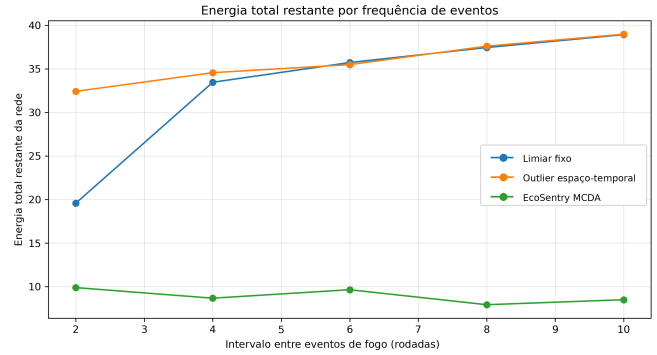


Fig. 3. Energia total por método de inserção de eventos de incêndio por intervalo.

ultrapassa 65%. Esses resultados indicam que a abordagem proposta é capaz de reduzir significativamente o custo de comunicação da rede, mantendo desempenho competitivo de detecção, sobretudo em cenários mais próximos de aplicações reais, onde eventos tendem a ser esparsos. A energia total para cada intervalo entre eventos é ilustrada na Figura 3.

De forma geral, os resultados demonstram o compromisso entre detecção e eficiência energética nos métodos avaliados. O método baseado em limiar apresenta maior sensibilidade, mantendo altas taxas de detecção mesmo em cenários com eventos frequentes, porém ao custo de maior consumo energético devido a maior quantidade de falsos positivos detectados. Por outro lado, a abordagem proposta reduz o volume de transmissões e o consumo energético da rede, com ganho médio de 13,74% em energia e redução média de 9,74% no tráfego intra-cluster, ao custo de uma perda média de 6,72 pontos percentuais na detecção. Já o método EcoSentry demonstrou baixa robustez, com tendência a disparar eventos de forma contínua, indicando limitação do índice de risco.

Adicionalmente, foi conduzido um terceiro experimento com inserção proposital de dados outliers em momentos aleatórios, considerando taxas de 5% e 10% de nós afetados por round. Nesse cenário, tanto o método baseado em limiar quanto a abordagem proposta não classificaram esses casos como eventos de incêndio. Esse comportamento pode ser explicado, no caso do limiar, pela influência da média global das leituras, que diminui o impacto de poucos nós anômalos. Já no método proposto, o critério mínimo de 30% de nós suspeitos no cluster atua como mecanismo de defesa, impedindo que outliers isolados ou falhas pontuais sejam interpretados como eventos. Esses resultados reforçam a capacidade do método em reduzir falsos positivos, mantendo consistência na detecção.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método de detecção de eventos em redes de sensores sem fio baseado em análise espaço-temporal de outliers integrado a um mecanismo de amostragem adaptativa. A proposta foi avaliada em um ambiente de simulação, permitindo analisar os impactos da decisão distribuída na detecção de eventos e no consumo energético da rede.

Os resultados indicam que a combinação entre confirmação coletiva e controle adaptativo de amostragem reduz o custo

de comunicação e aumenta a vida útil da rede, mantendo desempenho competitivo na detecção de incêndios. A abordagem também demonstrou robustez frente a ruídos e outliers isolados, pois evita que anomalias pontuais sejam interpretadas como eventos sem suporte espacial no cluster. Em cenários com eventos muito frequentes, entretanto, a maior variabilidade das leituras reduz a separabilidade entre comportamento normal e incêndio, afetando a sensibilidade do detector.

Como trabalhos futuros, pretende-se avaliar o ajuste dos parâmetros do modelo de detecção, incluindo tamanho das janelas temporais, limiares dos Z-scores, fração mínima de nós suspeitos e política de variação da taxa de amostragem, buscando configurações mais adequadas. Também serão incorporadas novas variáveis ambientais, como vento e características do material combustível, além da implementação em dispositivos de baixo consumo e redes LPWAN, como LoRa/LoRaWAN, para validação em condições mais próximas de aplicações reais.

REFERÊNCIAS

- [1] IBGE, “Amazônia legal,” <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15819-amazonia-legal.html>, 2025, acesso em: 23/12/2025.
- [2] Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, “Devido a incêndios, desmatamento sobe 8,4% na Amazônia de agosto de 2024 a junho de 2025; cerrado tem queda de 22,5%,” <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/devido-a-incendios-desmatamento-sobe-8-4-na-amazonia/-de-agosto-de-2024-a-junho-de-2025-cerrado-tem-queda-de/-22-5>, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, Jul. 2025, acesso em: 08/12/2025.
- [3] Y. Li, Y. Duan, H. Duan, and Z. Chen, “A parallel-based air-ground integration system for forest ecological monitoring,” in *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, 2021, pp. 324–327.
- [4] R. P. Aturu, S. Kanam, T. M. Khatib Al-Rubaye, S. A. V., and S. V. R., “Early forest fire detection and prevention using ultra-low-power co-processors with convolutional neural networks,” in *2025 International Conference on Intelligent Computing and Knowledge Extraction (ICICKE)*, 2025, pp. 1–6.
- [5] C. A. S. Lelis, J. J. Roncal, L. Silveira, R. D. G. De Aquino, C. A. C. Marcondes, J. Marques, D. S. Loubach, F. A. N. Verri, V. V. Curtis, and D. G. De Souza, “Drone-based ai system for wildfire monitoring and risk prediction,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 139 865–139 882, 2024.
- [6] H. N. Trung, Q. K. Le, T. M. Lam, K. D. Vu, and L. T. Dung, “Ecosentry: A cost-effective iot system for efficient real-time forest monitoring,” in *Decarbonizing Value Chains*, H. Kohl, G. Seliger, F. Dietrich, and H. T. Vien, Eds. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 146–154.
- [7] T. V. Muralidhar, V. V. S. Sandeep, P. Manohar, M. L. Krishna, K. Ruthvik, and S. Bagwari, “An iot based real time forest fire detection and alerting system using lora communication,” in *2024 11th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 2024, pp. 139–144.
- [8] J. Wang, N. Wang, B. Sun, K. Cao, H. Jung, M. A. El-Meligy, and M. Sharaf, “An improved data fusion algorithm based on cluster head election and grey prediction,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 22 746–22 758, 2024.
- [9] C. C. Chan, S. A. Alvi, X. Zhou, S. Durrani, N. Wilson, and M. Yebra, “A survey on iot ground sensing systems for early wildfire detection: Technologies, challenges, and opportunities,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 172 785–172 819, 2024.
- [10] E. S. Manolakis, D. V. Manatakis, and G. Xanthopoulos, “Temperature field modeling and simulation of wireless sensor network behavior during a spreading wildfire,” in *2008 16th European Signal Processing Conference*, 2008, pp. 1–5.
- [11] ns-3 Consortium, “ns-3 network simulator,” <https://www.nsnam.org/>, 2026, acesso em: 12/12/2025.
- [12] J. L. Gómez-González, E. Marcoulaki, A. Cantizano, M. Konstantinidou, R. Caro, and M. Castro, “Simulated fire observables as indicators for optimizing wireless sensor networks in wildfire risk monitoring,”

Ecological Indicators, vol. 175, p. 113509, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X2500439X>