13º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental
SIQA 2026
Tecnologias Ambientais e Inovação
23, 24 e 25 de setembro de 2026

REDES HÍBRIDAS DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR COM SENSORES DE BAIXO CUSTO: DESAFIOS OPERACIONAIS, INFRAESTRUTURAIS E DE GOVERNANÇA NO RIO DE JANEIRO

Fernando Lucas Gonçalves Silva – fernando.goncalves@prefeitura.rio
Secretaria de Meio Ambiente e Clima da Cidade do Rio de Janeiro
Rua Afonso Cavalcanti, 455, 12º andar
CEP 20.211-111 – Rio de Janeiro – RJ

Resumo: *A incorporação de sensores de baixo custo às redes convencionais de monitoramento da qualidade do ar constitui estratégia relevante para o adensamento espacial em centros urbanos marcados por heterogeneidade socioespacial, restrições orçamentárias e cobertura insuficiente das redes de referência. Embora esses equipamentos apresentem viabilidade técnica e potencial de ampliação da capacidade analítica, sua efetividade operacional demanda arranjos, rotinas e infraestrutura que frequentemente excedem as exigências da rede convencional. Este artigo analisa os desafios metodológicos, infraestruturais, tecnológicos e institucionais associados à implantação de sensores de baixo custo no município do Rio de Janeiro, Brasil, no contexto da formação de uma rede híbrida de monitoramento de $MP_{2,5}$, atualmente composta por estações automáticas de referência e mais de 30 sensores distribuídos em diferentes regiões administrativas. Em vez de priorizar a análise dos padrões espaciais de concentração, o estudo examina os processos de planejamento, seleção de sítios, instalação, operação, manutenção, transmissão de dados e coordenação interinstitucional, considerando os desafios enfrentados pela administração pública municipal. A experiência demonstra que o desempenho da rede híbrida depende da articulação entre representatividade espacial, infraestrutura física, segurança patrimonial, acessibilidade operacional e governança pública, e que a instalação em equipamentos municipais, como escolas e clínicas da família pode reduzir riscos de vandalismo e violação patrimonial, mas introduz barreiras administrativas associadas ao acesso, à autorização para instalação e à manutenção tempestiva. Portanto, a sustentabilidade dessas redes requer sensores tecnicamente adequados, protocolos institucionais robustos, documentação sistemática, rotinas de QA/QC e arranjos de governança capazes de integrar múltiplos órgãos públicos.*

Palavras-chave: *Qualidade do ar; Sensores de baixo custo; Redes híbridas; Governança ambiental.*

HYBRID AIR QUALITY MONITORING NETWORKS WITH LOW-COST SENSORS: OPERATIONAL, INFRASTRUCTURAL, AND GOVERNANCE CHALLENGES IN RIO DE JANEIRO

Abstract: *The incorporation of low-cost sensors into conventional air quality monitoring networks constitutes a relevant strategy for spatial densification in urban centers marked by socio-spatial heterogeneity, budgetary constraints, and insufficient coverage of reference networks. Although these devices present technical feasibility and potential for expanding analytical capacity, their operational effectiveness demands arrangements, routines, and infrastructure that frequently exceed the requirements of the conventional network. This article analyzes the methodological, infrastructural, technological, and institutional challenges associated with the implementation of low-cost sensors in the municipality of Rio de Janeiro, Brazil, in the context of the formation of a hybrid PM2.5 monitoring network, currently composed of automatic reference stations and more than 30 sensors distributed across different administrative regions. Instead of prioritizing the analysis of spatial concentration patterns, this study examines the processes of planning, site selection, installation, operation, maintenance, data transmission, and inter-institutional coordination, considering the challenges faced by municipal public administration. Experience demonstrates that the performance of the hybrid network depends on the articulation between spatial representativeness, physical infrastructure, property security, operational accessibility, and public governance, and that installation in municipal facilities, such as schools and family clinics, can reduce the risks of vandalism and property damage, but introduces administrative barriers associated with access, installation authorization, and timely maintenance. Therefore, the sustainability of these networks requires technically adequate sensors, robust institutional protocols, systematic documentation, QA/QC routines, and governance arrangements capable of integrating multiple public bodies.*

Keywords: *Air quality; Low-cost sensors; Hybrid networks; environmental governance.*

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento da qualidade do ar constitui uma dimensão estratégica da gestão ambiental urbana, pois fornece a base empírica necessária à avaliação da exposição populacional, à identificação de áreas críticas, à formulação de políticas de controle de emissões, à emissão de alertas à população e ao acompanhamento de tendências temporais de poluentes atmosféricos. Historicamente, o monitoramento da qualidade do ar tem sido estruturado por meio de estações automáticas de referência, equipadas com analisadores homologados, abrigos climatizados, sistemas de aquisição de dados, rotinas de calibração e procedimentos de validação técnica. Essas estações permanecem insubstituíveis para fins regulatórios e para avaliação de conformidade com padrões legais. Contudo, seu elevado custo de aquisição, instalação, operação e manutenção surgem como limitadores para a expansão espacial das

redes convencionais, especialmente em cidades extensas, morfologicamente complexas e marcadas por desigualdades socioambientais.

Nesse contexto, sensores de baixo custo tem sido progressivamente incorporados como instrumentos complementares às redes oficiais de monitoramento, permitindo maior capilaridade espacial, análise preliminar de gradientes intraurbanos, identificação de áreas com maiores concentrações de poluentes e produção de dados ambientais em regiões anteriormente não monitoradas (KUMAR et al., 2015; MORAWSKA et al., 2018; KARAGULIAN et al., 2019). Entretanto, a literatura técnica tem ressaltado que esses sensores não devem ser utilizados como substitutos diretos dos métodos de referência, mas como dispositivos de sensoriamento ambiental cuja aplicação requer definição clara de finalidade, avaliação de desempenho, co-localização, calibração local, correção de interferências ambientais e procedimentos sistemáticos de garantia e controle da qualidade dos dados (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2022; ZIMMERMAN, 2022).

A rede municipal de monitoramento da qualidade do ar do Rio de Janeiro, operada no âmbito do Programa MonitorAr-Rio, tem como eixo estruturante estações automáticas de referência responsáveis pela geração de dados de poluentes e variáveis meteorológicas utilizados para acompanhar o atendimento aos padrões de qualidade estabelecidos na Resolução CONAMA 506/2024, comunicação pública do Índice de Qualidade do Ar (IQAr) e formulação de políticas públicas relacionadas à qualidade do ar. Recentemente, a Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro passou a avaliar e incorporar sensores compactos de baixo custo de diferentes fabricantes, com o objetivo de ampliar a cobertura espacial, avaliar a aplicabilidade desses dispositivos na gestão local da qualidade do ar e aumentar a resolução do monitoramento de $MP_{2,5}$ em regiões da cidade que não eram monitoradas.

A experiência de implantação dessa rede híbrida evidenciou que a incorporação de sensores de baixo custo à infraestrutura pública de monitoramento atmosférico não deve ser compreendida apenas como ampliação instrumental da rede existente. Embora esses dispositivos permitam aumentar a densidade espacial das observações, a efetividade do seu uso depende de condições técnicas, operacionais e institucionais que extrapolam a capacidade do sensor de medir material particulado. Assim, a viabilidade técnica da tecnologia não garante, por si só, sua viabilidade operacional em uma rede distribuída e permanente.

Este artigo analisa os desafios operacionais, infraestruturais e de governança associados à implementação de uma rede híbrida de monitoramento da qualidade do ar com sensores de baixo custo no município do Rio de Janeiro. A discussão se concentra nos processos de planejamento, implantação, operação, manutenção e qualificação dos dados, em vez de priorizar a análise espacial das concentrações observadas de $MP_{2,5}$, buscando assim, demonstrar que redes híbridas de monitoramento constituem infraestruturas sociotécnicas, cuja sustentabilidade depende não apenas do desempenho dos sensores, mas da integração entre tecnologia, protocolos operacionais, capacidade institucional e aderência às condições reais do território urbano.

2. ARQUITETURA DA REDE HÍBRIDA

O MonitorAr-Rio é um programa da Secretaria de Meio Ambiente e Clima (SMAC) da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro que desde 2000 é responsável pela operação da Rede Municipal de Monitoramento da Qualidade do Ar da cidade. A rede híbrida implementada no Rio de Janeiro

combina dois níveis complementares de monitoramento da qualidade do ar. O primeiro é constituído por estações automáticas de referência, compostas por equipamentos homologados e orientadas à produção de dados de alta confiabilidade metrológica. No total, a cidade dispõe de 08 (oito) estações automáticas de referência dispostas em seu território. O segundo é formado por sensores compactos de baixo custo, distribuídos em diferentes pontos do território municipal, com a finalidade de aumentar a densidade espacial do monitoramento e subsidiar avaliações exploratórias da variabilidade intraurbana de $MP_{2,5}$.

Essa configuração segue uma lógica de complementaridade: enquanto as estações de referência funcionam como a espinha dorsal metrológica da rede, fornecendo séries históricas, parâmetros comparativos, dados para boletins oficiais, atendimento à legislação e suporte à validação dos sensores de baixo custo, os sensores ampliam a capilaridade espacial do sistema, permitindo observar regiões onde a instalação de estações completas seria técnica, física ou financeiramente inviável. Por essa razão, a rede híbrida deve ser compreendida como uma estratégia de adensamento apoiada em diferentes níveis de precisão, custo, escala e finalidade.

No Rio de Janeiro, a expansão da rede híbrida incorporou sensores de baixo custo provenientes de diferentes fabricantes, disponibilizados por meio de parcerias institucionais distintas. Em uma primeira iniciativa, foram recebidos 21 sensores compactos, distribuídos em diferentes regiões do município, com prioridade para áreas não contempladas por estações convencionais de monitoramento da qualidade do ar ou para localidades cuja necessidade de acompanhamento já havia sido indicada em estudos pretéritos conduzidos com estação móvel no âmbito do Programa MonitorAr-Rio. Essa estratégia permitiu ampliar a capilaridade territorial da rede, direcionando a instalação dos equipamentos para regiões com lacunas históricas de monitoramento ou com evidências prévias de relevância ambiental.

Em uma segunda parceria, foram disponibilizados 11 sensores de baixo custo destinados a compor dois projetos estratégicos da cidade, com alocação específica nas regiões do Centro e de Madureira. Nesses casos, a definição dos pontos esteve associada ao adensamento do monitoramento em áreas urbanas de interesse prioritário, incluindo territórios vinculados a políticas de mobilidade, circulação viária, exposição populacional e planejamento ambiental urbano.

Adicionalmente, dois sensores compactos provenientes de um terceiro fabricante foram instalados em estações automáticas de referência, com o objetivo de subsidiar estudos de co-localização e comparação de desempenho entre equipamentos de baixo custo e instrumentos convencionais. Em uma dessas estações, a ausência de monitoramento contínuo de $MP_{2,5}$ conferiu ao sensor compacto uma função complementar relevante: permitir a análise desse parâmetro em uma área já integrada à infraestrutura oficial de monitoramento, mas que ainda não era contemplada por analisador específico para material particulado fino.

A arquitetura híbrida também se estrutura por meio de pontos de co-localização entre sensores compactos e estações automáticas de referência. No âmbito das parcerias institucionais estabelecidas pelo município, há sensores de baixo custo instalados em co-localização nas estações de referência de Irajá, Centro, Pedra de Guaratiba, Tijuca e Campo Grande. Entre essas unidades, a Estação de Irajá assume papel estratégico por ser a única estação municipal equipada com instrumento homologado para monitoramento de $MP_{2,5}$, além de contemplar os demais parâmetros legais de monitoramento da qualidade do ar. Por essa razão, a unidade foi promovida a Centro de Estudos da

Qualidade do Ar (CEQAr Irajá), funcionando como ponto prioritário para avaliação comparativa dos diferentes equipamentos incorporados à rede.

Nesse arranjo, a cada novo conjunto de sensores de baixo custo disponibilizado ao município, ao menos uma unidade é alocada no CEQAr Irajá para comparação com o equipamento homologado de $MP_{2,5}$. Nas demais estações de referência, onde não há monitoramento homologado contínuo de $MP_{2,5}$, a comparação instrumental ocorre apenas em relação ao parâmetro MP_{10}. Essa distinção é metodologicamente relevante e será retomada na discussão sobre desempenho dos sensores, uma vez que a resposta dos sensores ópticos pode variar conforme a fração granulométrica analisada, a composição do aerossol e as condições ambientais locais.

A presença simultânea de sensores de diferentes fabricantes torna a rede tecnicamente mais abrangente, mas também operacionalmente mais complexa. Cada plataforma apresenta especificidades relacionadas à frequência de medição, variáveis monitoradas, parâmetros internos de diagnóstico, infraestrutura de transmissão, interface de visualização, protocolos de manutenção, requisitos de calibração e formatos de exportação de dados. Essa diversidade tecnológica exige capacidade institucional para harmonizar fluxos de informação, estabelecer critérios comuns de validação, comparar desempenhos e evitar que a multiplicação de dispositivos resulte em fragmentação operacional.

Assim, a rede híbrida não deve ser entendida como uma simples soma de equipamentos instalados no território, mas como um sistema integrado de monitoramento, cuja efetividade depende da articulação entre instrumentos de medição, infraestrutura urbana, transmissão de dados, manutenção, validação técnica e governança institucional, pois sua arquitetura envolve sensores de baixo custo, estações de referência, plataformas digitais, bancos de dados, rotinas de campo, protocolos de validação e mecanismos de governança. Desta forma, quanto maior o número de pontos instalados, maior a capacidade de representação espacial; porém, também aumentam os custos operacionais, a demanda por manutenção, o volume de dados, a necessidade de checagem técnica e a dependência de arranjos institucionais práticos e céleres.

3. ESTRATÉGIA DE SELEÇÃO DOS LOCAIS E IMPLANTAÇÃO

A seleção dos locais de instalação constitui uma das etapas mais críticas na implementação de redes híbridas de monitoramento da qualidade do ar. O Guia Técnico para o Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar estabelece que a implantação e expansão de redes de monitoramento devem considerar inventários de emissão, dados meteorológicos, relevo, topografia, uso e ocupação do solo, localização de fontes e objetivos específicos de monitoramento (BRASIL, 2019). Também destaca que a representatividade espacial de uma estação depende da relação entre o poluente monitorado, a proximidade das fontes, a intensidade das emissões, a topografia, o transporte atmosférico e a posição da sonda de amostragem em relação a obstáculos como edificações e árvores. Embora os sensores compactos apresentem menor complexidade física e operacional quando comparados às estações automáticas de referência, a equipe técnica do Rio de Janeiro optou, ainda na fase de planejamento da implantação, por submeter a seleção dos locais aos mesmos princípios fundamentais que orientam a instalação de estações de monitoramento da qualidade do ar. Essa decisão buscou minimizar a possibilidade de invalidação ou comprometimento dos dados por fatores associados à inadequação do ponto de amostragem, tais como baixa representatividade espacial, obstruções à livre circulação do ar,

proximidade excessiva de fontes emissoras pontuais, interferências físicas no entorno, altura inadequada de instalação e exposição insuficiente ao ar ambiente. Dessa forma, ainda que os sensores de baixo custo não tenham finalidade regulatória equivalente à dos métodos de referência, sua implantação foi orientada por critérios técnicos rigorosos, de modo a preservar a consistência interpretativa dos dados e aumentar sua utilidade como ferramenta complementar de diagnóstico ambiental.

A escolha de equipamentos públicos municipais como locais preferenciais de instalação respondeu a uma preocupação objetiva com a segurança patrimonial. Sensores instalados em áreas externas, postes, praças ou fachadas expostas podem estar sujeitos a vandalismo, furto, danos acidentais ou interferência indevida. Escolas, clínicas da família, centros municipais de saúde, hospitais, vilas olímpicas e outros equipamentos públicos oferecem algum grau de proteção física e institucional, além de possibilitarem conexão à rede elétrica e maior controle sobre o acesso ao equipamento. Essa estratégia é compatível com a recomendação do Guia Técnico de que, diante de riscos de vandalismo, destruição ou roubo, a instalação em escolas, quartéis, prédios públicos ou imóveis cedidos pode ser uma alternativa adequada, desde que o acesso dos operadores de campo seja garantido (BRASIL, 2019).

Entretanto, a utilização de equipamentos públicos não resolve todos os problemas de implantação. Em alguns casos, a localização mais segura dentro do imóvel não é a mais adequada do ponto de vista da circulação do ar. Coberturas, marquises, caixas d'água, muros, árvores, corredores estreitos, recuos internos e fachadas protegidas podem comprometer a livre captação do ar ambiente e introduzir vieses microambientais. Assim, a escolha do local exige conciliar segurança patrimonial, infraestrutura disponível, acessibilidade operacional e representatividade atmosférica, elementos que nem sempre convergem em um mesmo ponto de instalação.

A estratégia de seleção dos locais também considerou a presença de populações sensíveis e regiões vulneráveis. A instalação em escolas e unidades de saúde amplia a pertinência social do monitoramento, pois esses equipamentos atendem públicos potencialmente mais suscetíveis aos efeitos da poluição atmosférica, como crianças, idosos, pessoas com doenças respiratórias e populações expostas a condições socioambientais adversas. Contudo, a relevância social do local não dispensa sua avaliação técnica. A rede deve buscar simultaneamente pertinência epidemiológica, representatividade espacial e qualidade operacional.

Como etapa metodológica associada à implantação da rede híbrida, foi desenvolvido um instrumento operacional de vistoria para avaliação prévia dos locais candidatos à instalação dos sensores compactos. A elaboração desse *checklist* respondeu à necessidade de converter diretrizes técnicas de monitoramento da qualidade do ar em um procedimento de campo padronizado, capaz de apoiar decisões em contextos urbanos nos quais os critérios ideais de microlocalização frequentemente entram em conflito com limitações físicas, administrativas, patrimoniais e infraestruturais.

O instrumento foi estruturado a partir de critérios de representatividade espacial, segurança patrimonial, acessibilidade operacional e disponibilidade de infraestrutura mínima para funcionamento contínuo dos equipamentos. Foram contempladas variáveis como presença de obstáculos próximos, proximidade de fontes emissoras, intensidade aparente das emissões, existência de população sensível no entorno, uso e cobertura do solo, densidade demográfica, fluxo de pessoas, características topográficas, disponibilidade de energia elétrica formal, conectividade móvel, possibilidade de instalação em altura adequada, facilidade de acesso pelas equipes técnicas e classificação final da aptidão do local para receber sensores compactos ou estações de referência.

Relatório de Vistoria

Local de interesse:
Endereço:
Indicação: Data da vistoria:

Segurança
( ) câmera de segurança ( ) local delimitado por muro ( ) portaria/recepção ( ) vigia/guarda municipal/segurança ( ) policiamento próximo ( ) outro:

Localização
Obstáculos próximos* ( ) edificação ( ) árvores menos de 10 m ( ) placa/outdoor ( ) outro: Fontes de emissão ( ) vias de grande tráfego ( ) chaminés ( ) CGEE ( ) indústria ( ) outro: Intensidade das emissões ( ) não observada ( ) baixa ( ) moderada ( ) alta ( ) outro: População sensível próxima ( ) escola ( ) hospital ( ) igreja ( ) shopping ( ) praça ( ) outro: Uso do solo ( ) residencial ( ) comercial ( ) industrial ( ) misto ( ) outro: Densidade demográfica ( ) baixa ( ) média ( ) alta Fluxo de pessoas ( ) baixo ( ) médio ( ) alto Cobertura do solo ao redor da estação ( ) solo exposto ( ) asfalto ( ) paralelepípedos ( ) grama ( ) outro: Topografia e Relevo ( ) plano ( ) complexa ( ) topo ( ) vale ( ) encosta ( ) base do sensor acima da via ( ) outro:

*distância ideal: dobro da altura do obstáculo acima da sonda amostradora

Aspectos técnicos
( ) ponto para a instalação do sensor na altura de captação ( ) conectividade de dados móveis 3G/4G/5G ( ) disponibilidade de energia elétrica formal ( ) placas de luz solar ( ) acessibilidade aos operadores de campo <u>Escala espacial de representatividade</u> ( ) Microescala ( ) Mesoescala ou média ( ) Bairro ( ) Urbana

Histórico da região
( ) episódios pretéritos de má qualidade do ar

Observações

Aptidão
( ) o local está apto para instalação de sensores compactos e estações de referência ( ) o local está apto para instalação de sensores compactos ( ) o local está apto para instalação de sensores compactos com restrições ( ) o local não está apto para instalação de sensores compactos ou estações de referência

Fotos

A utilização do *checklist* permitiu reduzir a subjetividade da seleção dos pontos, uniformizar os registros de campo e documentar tecnicamente as restrições observadas em cada sítio avaliado. Além de subsidiar a escolha inicial dos locais, o instrumento também se mostrou relevante para a reavaliação posterior da rede, especialmente nos casos em que as condições efetivas de instalação revelaram limitações não plenamente identificadas na etapa preliminar, como obstruções físicas, restrições de circulação do ar, dificuldades de acesso ou inadequações em relação à representatividade pretendida.

A experiência do Rio de Janeiro mostrou que a implantação de sensores não deve ser tratada como etapa definitiva, mas como fase inicial de uma rotina adaptativa de verificação. A vistoria prévia reduz riscos de inadequação, mas não elimina a necessidade de inspeção pós-instalação, análise da consistência dos dados, avaliação de interferências locais e eventual realocação. A realocação de

sensores, nesse sentido, não deve ser interpretada como falha metodológica, mas como componente normal da otimização de redes ambientais em cidades complexas.

A seleção de sítios para sensores de baixo custo, portanto, não pode ser orientada exclusivamente pela disponibilidade física do local ou pela conveniência administrativa da instalação. Mesmo em equipamentos públicos municipais, como escolas, clínicas da família e centros de saúde, a adequação do ponto depende da compatibilidade entre critérios atmosféricos, infraestrutura existente, segurança, acesso operacional e governança local. Em ambientes urbanos complexos, não é raro que o local tecnicamente ideal não coincida com o local fisicamente disponível, seguro, acessível e administrativamente viável.

Embora a elaboração do *checklist* tenha sido fundamentada em diretrizes estabelecidas para instalação de estações de referência no Guia Técnico para o Monitoramento e Avaliação da Qualidade do Ar do Ministério do Meio Ambiente, o *checklist* também incorporou a experiência acumulada ao longo da operação do Programa MonitorAr-Rio. Essa expertise foi especialmente relevante por evidenciar que a qualidade de uma rede de monitoramento não depende apenas da adequação técnica do ponto de amostragem, mas também de fatores operacionais frequentemente críticos, como segurança patrimonial, disponibilidade de infraestrutura de apoio, acesso das equipes de campo, continuidade da alimentação elétrica e condições físicas para instalação e manutenção dos equipamentos. Por essa razão, o formulário deve ser compreendido como instrumento adaptável, e não como um protocolo normativo universal. Sua aplicação, portanto, deve considerar as características ambientais, urbanísticas, tecnológicas e administrativas de cada município, bem como os objetivos específicos da rede de monitoramento.

4. GOVERNANÇA E COORDENAÇÃO INSTITUCIONAL

A implantação de redes híbridas de monitoramento atmosférico em áreas urbanas depende de arranjos de governança capazes de coordenar múltiplos atores, responsabilidades e temporalidades operacionais. Diferentemente de uma estação de referência instalada em área própria e controlada pelo órgão ambiental, sensores distribuídos em dezenas de equipamentos públicos tornam-se dependentes da cooperação cotidiana entre diferentes setores da administração municipal. Essa condição transforma o monitoramento da qualidade do ar em uma rede interinstitucional que exige uma articulação bem estruturada.

No Rio de Janeiro, o papel do Centro de Operações Rio (COR) foi particularmente relevante como instância de centralização, articulação e suporte à comunicação entre os órgãos municipais envolvidos, principalmente na etapa de instalação dos sensores compactos. A centralização da interlocução no COR contribuiu para reduzir a fragmentação administrativa, organizar fluxos de informação, facilitar o contato com órgãos responsáveis por equipamentos públicos e apoiar a gestão operacional em um ambiente urbano complexo. Todavia, vale ressaltar que a existência de um ponto central de coordenação não elimina automaticamente os entraves burocráticos associados ao acesso aos locais, à autorização para instalação, à compatibilização de agendas e à execução de manutenções corretivas.

A experiência analisada demonstra que mesmo equipamentos pertencentes à administração pública municipal podem apresentar barreiras administrativas para instalação dos equipamentos e

posterior acompanhamento das demandas de manutenção. Uma clínica da família, uma escola ou um centro de saúde possuem rotinas próprias, chefias locais, horários de funcionamento, protocolos de segurança, restrições de acesso e prioridades institucionais que nem sempre coincidem com a urgência técnica da manutenção dos sensores. Assim, a falha de um equipamento ou a interrupção da transmissão de dados não depende apenas da capacidade técnica da equipe responsável, mas também da possibilidade de acesso físico ao local em tempo oportuno.

Esse aspecto é central para compreender a diferença entre desempenho instrumental e efetividade operacional. Um sensor pode ser adequado em termos de especificação, apresentar boa correlação em co-localização e possuir plataforma de transmissão funcional. Ainda assim, sua contribuição para a rede pode ser comprometida se a equipe de campo não conseguir acessar o equipamento para limpeza, reinicialização, substituição de módulo, verificação de energia ou manutenção corretiva. A sustentabilidade da rede, portanto, requer protocolos institucionais que assegurem acesso regular e emergencial aos pontos instalados.

A governança da rede deve contemplar, no mínimo, a definição formal dos responsáveis por cada unidade que irá abrigar os sensores, a criação de canais de comunicação permanentes, a autorização prévia para entrada de equipes técnicas, a padronização de fluxos para manutenção, a documentação de intervenções, a hierarquização de prioridades e a pactuação de prazos de resposta. Do contrário, a informalidade se torna um potencial risco à continuidade operacional.

O processo de execução da instalação dos sensores no Rio de Janeiro indicou que redes híbridas exigem uma arquitetura institucional proporcional à sua arquitetura tecnológica, pois a ampliação do número de sensores precisa ser acompanhada por instrumentos de gestão que evitem que a rede se torne operacionalmente dispersa. Isso inclui protocolos de acesso, planejamento de manutenção preventiva, definição de responsabilidades entre órgão ambiental, fornecedores e unidades hospedeiras, além de mecanismos de escalonamento para situações críticas de perda de dados ou comprometimento operacional.

5. OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E QA/QC

Após a instalação, a sustentabilidade da rede passa a depender da continuidade operacional, da consistência das séries temporais e da confiabilidade dos dados produzidos. Sensores de baixo custo operam continuamente, em geral com alta frequência temporal, gerando grandes volumes de dados que precisam ser transmitidos, armazenados, verificados e interpretados. Nesse contexto, as rotinas de operação, manutenção e garantia da qualidade não podem ser tratadas como atividades secundárias, mas como componentes estruturantes da rede híbrida.

A garantia e o controle da qualidade (Quality Assurance/Quality Control – QA/QC) constituem o conjunto de práticas destinadas a assegurar que os dados produzidos atendam aos requisitos técnicos definidos para sua finalidade de uso. Embora frequentemente tratados de forma integrada, esses conceitos possuem funções complementares. A Garantia da Qualidade (QA) compreende os procedimentos preventivos e planejados que buscam reduzir a ocorrência de erros e incertezas ao longo do ciclo de vida do monitoramento, incluindo seleção dos equipamentos, critérios de instalação, calibração, manutenção, capacitação das equipes, padronização de processos operacionais e documentação técnica. O Controle da Qualidade (QC), por sua vez, corresponde às atividades de

verificação, inspeção e validação realizadas durante a operação da rede, com o objetivo de identificar, corrigir ou mitigar erros, inconsistências e falhas que possam comprometer a confiabilidade das informações produzidas.

Em redes híbridas que incorporam sensores de baixo custo, os procedimentos de QA/QC assumem papel particularmente relevante em razão da maior suscetibilidade desses equipamentos a interferências ambientais, variações de desempenho entre unidades, falhas de comunicação e potenciais desvios de resposta ao longo do tempo. Dessa forma, o QA/QC deve ser compreendido não apenas como uma etapa de tratamento de dados, mas como um sistema de gestão da qualidade da rede, envolvendo desde a seleção do local de instalação até a interpretação final da informação ambiental gerada.

As rotinas de manutenção preventiva integram esse sistema de garantia da qualidade. Elas devem incluir inspeção visual do equipamento, verificação da fixação do equipamento ao local instalado, avaliação das condições de alimentação elétrica ou solar, checagem da conectividade, análise de parâmetros internos de diagnóstico, verificação do estado de entradas de ar, limpeza quando aplicável, inspeção de cabos e suportes e conferência da integridade da transmissão. Essas ações reduzem a probabilidade de falhas, aumentam a estabilidade operacional e permitem identificar precocemente condições que possam comprometer a qualidade dos dados.

A manutenção corretiva, por sua vez, deve responder a falhas de transmissão, ausência de dados, repetição de valores, instabilidade de parâmetros meteorológicos, picos atípicos, leituras incompatíveis com o comportamento esperado do local, interrupções prolongadas e indícios de comprometimento instrumental. A avaliação operacional preliminar de alguns sensores mostrou a ocorrência de diferentes padrões de instabilidade, incluindo falhas constantes de transmissão, dados repetidos de $MP_{2,5}$ e MP_{10}, valores muito elevados posteriormente desconsiderados do boletim diário e relatórios de diagnóstico ambiental, instabilidade em variáveis meteorológicas e ocorrência de picos de material particulado que exigiram reavaliação técnica. Esses exemplos demonstram que a transmissão de dados não equivale automaticamente à produção de dados válidos.

O QC deve atuar em camadas sucessivas. A primeira camada corresponde a testes automáticos de integridade, destinados a identificar dados ausentes, valores negativos, registros repetidos, leituras invariáveis, quebras temporais, falhas de *timestamp* e valores fisicamente implausíveis. A segunda camada envolve testes de consistência temporal, avaliando se a série apresenta comportamento compatível com ciclos diurnos, padrões de emissão, condições meteorológicas e histórico do local. A terceira camada corresponde à comparação espacial e instrumental, incluindo confronto com sensores próximos e com estações de referência. A quarta camada envolve avaliação técnica especializada, necessária para interpretar eventos ambíguos, picos de curta duração, possíveis interferências locais e inconsistências não detectáveis automaticamente.

A co-localização com estações de referência constitui uma etapa fundamental desse processo, uma vez que a operação conjunta de sensores compactos e monitores convencionais permite avaliar correlação, viés, sensibilidade, resposta a condições meteorológicas e estabilidade ao longo do tempo. Essa estratégia é indispensável para transformar sensores de baixo custo em instrumentos operacionais de apoio à gestão pública, pois permite identificar limitações locais, estabelecer procedimentos de correção e definir limites de aplicabilidade dos dados gerados.

Outro desafio relevante é o volume de dados. Sensores que transmitem informações a cada dez minutos geram um fluxo contínuo de registros de poluentes e variáveis meteorológicas. Com

dezenas de equipamentos em operação, a validação exclusivamente manual se torna inviável. Assim, a escalabilidade da rede depende da implementação de rotinas semiautomatizadas de QA/QC, com geração de alertas, aplicação de flags, documentação de intervenções e integração entre plataformas. A atuação técnica humana permanece indispensável, mas deve ser concentrada nos casos de maior complexidade, e não na verificação repetitiva de todos os registros.

Por fim, a classificação operacional dos sensores em categorias de desempenho, ressalvas operacionais e comprometimento operacional representa uma prática relevante de gestão da rede. Essa classificação permite priorizar intervenções, diferenciar problemas pontuais de falhas persistentes e orientar decisões sobre manutenção, substituição ou realocação dos equipamentos. Dessa forma, a operação da rede passa a ser orientada não apenas pela disponibilidade nominal dos sensores, mas pela qualidade efetiva da informação produzida.

6. ESCALABILIDADE E APLICABILIDADE

A escalabilidade de redes híbridas costuma ser associada ao menor custo unitário dos sensores de baixo custo. Contudo, a experiência do Rio de Janeiro demonstra que o custo do equipamento representa apenas uma fração da complexidade total da rede. Cada novo sensor adiciona demandas de instalação, documentação, conectividade, energia, manutenção, validação, armazenamento de dados, comunicação institucional e resposta a falhas. Portanto, a escalabilidade real depende da capacidade de a administração pública sustentar operacionalmente a expansão tecnológica.

Em cidades onde há lacunas históricas de monitoramento, restrições orçamentárias e forte desigualdade territorial, sensores de baixo custo oferecem uma oportunidade concreta de ampliação da cobertura espacial. Entretanto, essa oportunidade pode ser comprometida caso a expansão não seja acompanhada por protocolos de governança, financiamento de manutenção, capacitação técnica e integração com a rede de referência. Dessa forma, a multiplicação de sensores sem suporte operacional pode gerar uma rede numericamente densa, mas tecnicamente frágil.

O caso do Rio de Janeiro sugere que a replicação metodológica em outras cidades deve considerar alguns princípios. O primeiro é a formalização de critérios de seleção por meio de *checklist* técnico-operacional, incorporando variáveis atmosféricas, urbanísticas, infraestruturais e institucionais. O segundo é a definição prévia da função dos sensores no sistema de monitoramento, distinguindo usos exploratórios, comunicacionais, epidemiológicos e territoriais. O terceiro é a incorporação de pontos de co-localização com estações de referência desde a etapa inicial do projeto. O quarto é o estabelecimento de rotinas automatizadas e manuais de QA/QC. O quinto é a criação de protocolos de acesso e manutenção com os responsáveis pelos locais de instalação.

A escalabilidade também deve ser compreendida como otimização da representatividade espacial, e não apenas como ampliação do número absoluto de sensores. Em uma rede híbrida, a definição da área de abrangência de cada ponto, a identificação de lacunas territoriais, a análise de redundâncias e a avaliação da escala espacial de representatividade podem reduzir instalações desnecessárias, melhorar a distribuição dos equipamentos e direcionar recursos para áreas prioritárias. Nesse sentido, uma rede mais eficiente não é necessariamente aquela com maior número de sensores, mas aquela capaz de produzir informação ambiental de qualidade, interpretável e espacialmente representativa.

A rede também deve ser avaliada sob o ponto de vista da justiça ambiental. Em cidades marcadas por desigualdades socioespaciais, a ausência de monitoramento em determinadas regiões pode reforçar invisibilidades ambientais. A ampliação da rede para áreas vulneráveis, favelizadas, com baixa arborização, alta densidade populacional ou proximidade de corredores de transporte pode contribuir para reduzir assimetrias informacionais e apoiar políticas públicas mais territorializadas.

Assim, uma metodologia aplicável à seleção, instalação e operação de uma rede híbrida de sensores compactos e monitores de referência não depende apenas da disponibilidade de equipamentos, mas da construção de uma infraestrutura pública que inclua pessoas, protocolos, plataformas, contratos, rotinas, documentação, governança e capacidade de aprendizagem institucional. A rede deve ser capaz de corrigir sua própria configuração ao longo do tempo, realocando sensores, revisando critérios, substituindo equipamentos, atualizando procedimentos de validação e refinando sua estratégia espacial.

A experiência do Rio de Janeiro mostra que a realocação de sensores após a implantação deve ser prevista como mecanismo de otimização da representatividade espacial, e não como indicador de insucesso. Em contextos urbanos reais, conflitos entre critérios técnicos ideais e limitações físicas são inevitáveis. A maturidade operacional está em reconhecer esses conflitos, documentar os desafios enfrentados e adaptar a solução quando necessário.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação de redes híbridas de monitoramento da qualidade do ar com sensores de baixo custo representa uma alternativa promissora para ampliar a cobertura espacial da observação atmosférica em cidades complexas. No caso do Rio de Janeiro, a integração entre estações de referência e mais de 30 sensores compactos permitiu avançar no adensamento do monitoramento de $MP_{2,5}$ e na avaliação da aplicabilidade desses equipamentos à gestão pública da qualidade do ar. Entretanto, a experiência mostrou que o principal desafio não é apenas tecnológico, mas operacional, infraestrutural e institucional.

Além disso, a viabilidade técnica dos sensores não garante sua efetividade em uma rede permanente. Equipamentos potencialmente adequados podem ter sua utilidade comprometida por falta de energia, instabilidade de conectividade, obstruções físicas, acesso burocraticamente limitado, falhas de transmissão, ausência de manutenção tempestiva ou insuficiência de procedimentos de QA/QC. Assim, uma rede híbrida deve ser concebida como sistema sociotécnico, no qual sensores, infraestrutura urbana, protocolos técnicos e governança pública são componentes indissociáveis.

A utilização de equipamentos públicos municipais, como escolas, clínicas da família, hospitais e centros de saúde, revelou-se uma estratégia adequada para reduzir riscos de vandalismo e viabilizar a instalação em áreas de interesse social. Contudo, essa escolha introduziu desafios administrativos relevantes, pois mesmo dentro da administração municipal, a autorização para acesso, a compatibilização de agendas e a execução de manutenções podem enfrentar barreiras burocráticas que afetam a continuidade dos dados. Redes ambientais urbanas exigem, portanto, arranjos institucionais capazes de garantir agilidade operacional sem comprometer a segurança e a organização dos serviços públicos.

Do ponto de vista metodológico, o desenvolvimento de *checklist* de vistoria, a adoção de critérios de representatividade, a co-localização com estações de referência, a classificação operacional

dos sensores, a validação contínua dos dados e a análise integrada de variáveis meteorológicas constituem elementos fundamentais para a robustez da rede, uma vez que tais procedimentos permitem transformar dados brutos de sensores compactos em informação aplicável na gestão pública.

O caso do Rio de Janeiro oferece lições relevantes para outras cidades que buscam avançar na implantação ou no adensamento de redes de qualidade do ar. A adoção de sensores de baixo custo pode reduzir lacunas de monitoramento e ampliar a visibilidade de áreas vulneráveis, mas deve ser acompanhada por planejamento técnico e operacional, governança interinstitucional e compromisso com a qualidade dos dados. A expansão da rede não deve ser medida apenas pelo número de sensores instalados, mas pela capacidade de manter operando, validar adequadamente e interpretar limitações.

Entre os produtos metodológicos replicáveis da experiência destaca-se o *checklist* operacional de vistoria idealizado e consolidado pela Gerência de Monitoramento do Ar da SMAC. Sua aplicação pode auxiliar outras cidades na etapa de triagem de sítios, especialmente em contextos nos quais a implantação de sensores compactos exige conciliar critérios técnicos de representatividade atmosférica com restrições de infraestrutura, segurança, acesso e governança local.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 506, de 5 de julho de 2024**. Dispõe sobre padrões nacionais de qualidade do ar. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Departamento de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos. **Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar**. Brasília, DF: MMA, 2019.

KARAGULIAN, F. et al. Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. **Atmosphere**, v. 10, n. 9, artigo 506, 2019.

KUMAR, P. et al. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. **Environment International**, v. 75, p. 199-205, 2015.

MORAWSKA, L. et al. Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: how far have they gone? **Environment International**, v. 116, p. 286-299, 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Enhanced Air Sensor Guidebook**. Washington, DC: U.S. EPA, 2022.

ZIMMERMAN, N. Tutorial: Guidelines for implementing low-cost sensor networks for aerosol monitoring. **Journal of Aerosol Science**, v. 159, artigo 105872, 2022.