

## Sensores de Baixo Custo para monitoramento da qualidade do ar: Uma Revisão Sistemática para América Latina

### Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring: A Systematic Review for Latin America

**RESUMO:** A poluição atmosférica é considerada o principal fator de risco ambiental para a saúde no mundo. Porém, apesar dessa importância, a medição de poluentes atmosféricos ainda é um desafio em muitas partes do mundo, considerando este cenário, buscamos com esta revisão sistemática investigar o uso de sensores de baixo custo (SBC) para monitoramento do ar na América Latina, onde a má distribuição de estações oficiais limita a gestão ambiental. Utilizando o protocolo PRISMA, foram analisados 87 artigos publicados nos últimos dez anos nas bases Scopus e Web of Science. Os resultados indicam que o material particulado (PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>) são os parâmetros mais monitorados, com destaque para as marcas Alphasense, Sensirion e Nova Fitness. O custo médio identificado foi de US\$ 71 e US\$ 1.573. Redes de monitoramento foram identificadas em 11 cidades, evidenciando o potencial de espacialização de dados. Contudo, a precisão dos SBC é afetada por fatores como umidade e temperatura, tornando a calibração rigorosa indispensável para a confiabilidade dos dados. Conclui-se que os SBC são ferramentas promissoras para complementar redes tradicionais, embora persistam desafios técnicos de manutenção, padronização e a necessidade de pessoal capacitado para garantir a qualidade das informações coletadas.

**Palavras Chave:** Poluição Atmosférica. Monitoramento Ambiental. Internet das Coisas. Cidades Inteligentes.

#### ABSTRACT:

Air pollution is considered the primary environmental health risk factor worldwide. However, despite its importance, measuring air pollutants remains a challenge in many parts of the world. Considering this scenario, this systematic review aims to investigate the use of low-cost sensors (LCS) for air quality monitoring in Latin America, where official monitoring coverage is often insufficient. Following the PRISMA protocol, 28 articles from Scopus and Web of Science were selected for analysis. The results show that PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> are the primary pollutants monitored, with Alphasense, Sensirion, and Nova Fitness identified as the main manufacturers. The average cost for these devices is USD 672.55, ranging from USD 71 to USD 1,573. Monitoring networks were implemented in at least 11 cities, demonstrating the potential for localised data. However, environmental variables such as humidity and temperature significantly impact accuracy, requiring robust calibration through linear regression or machine learning. The study concludes that LCS are vital for expanding monitoring capabilities in the Global South, but technical challenges regarding maintenance, data validation, and the lack of standardisation remain. Effective use depends on specialised technical support to ensure data reliability for environmental management and citizen science initiatives.

**Keywords:** Air Pollution. Environmental Monitoring. Internet of Things. Smart Cities.

## 1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar é o principal fator de risco ambiental para a saúde no mundo. Sendo responsável por cerca de 6,4 milhões de mortes com custo global referentes a mortalidade e morbidade de cerca US\$ 8,1 trilhões, equivalente a 6,1% do produto interno bruto (PIB) global (WORLDBANK, 2022). Atualmente 99% da população global está exposta a condições de ar insalubre, tornando essa uma das principais preocupações ambientais para a saúde e o bem-estar da humanidade, ao lado das mudanças climáticas (IQAIR, 2023).

Dentre os elementos que constituem essas ameaças, existem diferentes tipos de poluentes atmosféricos, ex: materiais particulados (MP), metano, óxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e ozônio, entre outros. Entre esses poluentes, estudos recentes têm consistentemente identificado os MP como os mais perigosos para a saúde humana (Yaduma et al., 2013).

**Comentado [A1]:** Inserir um ponto final após a palavra "mundo".

**Comentado [A2]:** Custo dos sensores? Foram citados 3 marcas de sensores. Esse custo é do mais barato e do mais caro? Verificar isso e ajustar o texto para deixar a informação clara. No abstract, esses valores constam como o mínimo e o máximo da faixa de preços.

**Comentado [A3]:** Verificar comentário anterior.

52 Dada à importância do tema, diversas metodologias têm sido postas a prova para  
53 contribuir com a geração de dados que subsidiem a produção de indicadores e análises de  
54 situação (Martins et al., 2021; Graça et al., 2023).

55 Porém, apesar dessa importância, a medição de poluentes atmosféricos ainda é um  
56 desafio em muitas partes do mundo. Algumas das dificuldades na análise de poluentes  
57 atmosféricos são a baixa concentração, a composição química complexa e a presença de  
58 misturas de compostos no ar. Na tentativa de captar os diferentes tipos de poluente, dispositivos  
59 de monitoramento usam uma variedade de métodos de medição, dependendo da classe de  
60 poluentes que está sendo medida (Hernández-Gordillo et al., 2021).

61 Tradicionalmente são utilizadas estações de monitoramento fixas de alta qualidade para  
62 avaliar o impacto da poluição do ar. Essas estações fixas, porém, apresentam alto custo de  
63 compra e manutenção, limitando sua ampla utilização. Com isso, a baixa densidade de estações,  
64 distribuídas no território impede a obtenção de dados sobre a variabilidade espacial da poluição  
65 do ar (Gramsch et al., 2021).

66 No Brasil, por exemplo, até o mês de janeiro de 2026 havia apenas 247 estações de  
67 monitoramento cadastradas no MonitorAr – Sistema de Monitoramento oficial do Ministério  
68 do Meio Ambiente. Destas 187 estão localizadas em apenas 4 dos 27 estados do país. Isso  
69 demonstra como há uma má distribuição de estações de monitoramento da qualidade do ar no  
70 país. Ainda assim, estão ocorrendo avanços como a recente implementação da Política Nacional  
71 de Qualidade do Ar (PNQAr) do Brasil (Tavella et al., 2024), que atualizou os parâmetros de  
72 qualidade do ar e estabeleceu metas para os próximos 5, 10 e 15 anos.

73 No entanto, para continuar com esses avanços no monitoramento da qualidade do ar é  
74 necessária a produção de dados de alta resolução espacial e temporal que possam fomentar o  
75 desenvolvimento de modelos de poluição e exposição mais adequados às diferentes realidades  
76 e contextos espaciais, socioeconômicos e ambientais (Ahumada et al., 2022). Por outro lado, as  
77 mesmas técnicas poderiam ser aplicadas por meio da miniaturização do sensor, resultando em  
78 um dispositivo prático com baixo consumo de energia

79 Em função dessa realidade é que os sensores de baixo custo (LCS – Low Cost Sensors)  
80 surgem como uma alternativa promissora para complementar os dados obtidos pelas estações  
81 convencionais. Estes sensores são caracterizados por seu tamanho e peso reduzidos, requisitos  
82 de energia relativamente baixos, tempo de resposta curto e adaptabilidade de rede em tempo  
83 real. Os LCS geram benefícios como o fornecimento de dados em tempo real, facilidade de uso,  
84 e amostragem rápida (Kortoçi et al., 2022); além disso, devido ao seu baixo custo, existe a  
85 facilidade de implantação de uma quantidade significativa de sensores o que podem trazer  
86 benefícios para um melhor mapeamento da poluição (Li et al., 2020). Essas informações com  
87 uma metodologia de correlação adequada podem ser calibradas com estações de referência  
88 tornando os dados mais precisos e confiáveis (Romero et al., 2020).

89 Por isso, o uso de sensores de qualidade do ar de baixo custo em países de baixa renda  
90 tem sido uma maneira possível de ajudar a reforçar a capacidade de monitoramento da  
91 qualidade do ar e, assim, ajudar a melhorar as estimativas de exposição (Coker et al., 2022). O  
92 desenvolvimento desses sensores de baixo custo resultou em uma mudança no paradigma de  
93 monitoramento, com uma mudança do modelo centrado em iniciativas governamentais  
94 dominante para o estabelecimento de um modelo de redes de monitoramento baseadas na  
95 comunidade. A facilidade com que os cidadãos podem adquirir monitores de qualidade do ar  
96 levou ao desenvolvimento de vários projetos de crowdsourcing que visam aumentar a densidade  
97 das redes de monitoramento em regiões que atualmente não dispõem de equipamentos de  
98 monitoramento da qualidade do ar (Tagle et al., 2020).

99 Embora o uso desses sensores de baixo custo tragam uma série de benefícios, ainda há  
100 desafios em relação ao seu uso, sobretudo em relação à qualidade e calibração dos dados dos

Comentado [A4]: Corrigir a concordância verbal

101 sensores (Hernández-Gordillo et al., 2021). Por isso se faz necessário conhecer melhor as  
102 opções de sensores disponíveis atualmente e seus pontos fortes e fracos.

103 Com base nisso, elaboramos essa revisão sistemática de literatura com o objetivo de  
104 avaliar o estado da arte relativo à utilização de sensores de baixo custo para monitoramento  
105 ambiental na América Latina. A partir do qual buscamos responder às seguintes perguntas: 1)  
106 Quais os principais sensores utilizados? 2) Quais as principais grandezas físicas analisadas? 3)  
107 Qual o custo médio dos sensores de baixo custo? 4) Qual a abrangência dos sensores? 5)  
108 Quantas cidades no Brasil e na América Latina estão utilizando? 6) Quantas redes de  
109 monitoramento com base em sensores de baixo custo existem no Brasil e na América Latina?

## 110 2. MATERIAIS E MÉTODO

111 A revisão sistemática partiu de um protocolo de pesquisa com auxílio do checklist  
112 PRISMA (Liberati et al., 2009). Com base nesse protocolo foram definidas as características  
113 da busca seguindo o roteiro PICOC: a) População: como os artigos que abordam sensores de  
114 baixo custo para monitoramento ambiental; b) Intervenção: sendo os artigos que tratem de  
115 monitoramento de variáveis ambientais relacionadas a poluição atmosférica e serviços  
116 ecossistêmicos com sensores de baixo custo; c) Comparação: O custo e a qualidade dos dados  
117 dos sensores utilizados em relação aos sensores referenciais; d) Outcome: Quais os sensores de  
118 baixo custo mais utilizados e indicados para o monitoramento de variáveis ambientais  
119 relacionadas a poluição atmosférica e serviços ecossistêmicos; e) Contexto: Todos os estudos  
120 relacionados aos sensores de baixo custo desenvolvidos no Brasil e na América Latina.

121 A partir desse protocolo foram realizadas 7 etapas: 1 – Delimitação da questão a ser  
122 pesquisada; 2 – Escolha das fontes de dados; 3 – Eleição das palavras-chave para a busca; 4 –  
123 busca e armazenamento dos resultados; 5 – seleção de artigos pelos títulos e resumos de acordo  
124 com os critérios de inclusão e exclusão; 6 – Avaliação dos artigos selecionados; 7 – Síntese e  
125 interpretação dos resultados. Para a organização dessas etapas utilizamos o software Parsifal,  
126 que contém o protocolo da revisão disponível no endereço:

127 Para a primeira etapa as questões definidas foram: A) Quais os principais sensores  
128 utilizados? B) Quais as principais grandezas físicas analisadas? C) Qual o custo médio dos  
129 sensores de baixo custo? D) Qual a abrangência dos sensores? E) Quantas cidades no  
130 Brasil e na América Latina estão utilizando? F) Quantas redes de monitoramento com base em  
131 sensores de baixo custo existem?

132 Para a segunda etapa foram escolhidas as bases de dados de textos: Scopus e Web of  
133 Science. A escolha por essas bases se deu em função da temática multidisciplinar do tema e da  
134 abrangência dessas bases de dados. Para as etapas três e quatro foram escolhidas as palavras-  
135 chave: “Low-cost Sensor”, “Air Quality”. A escolha destas se deu pela adequação às perguntas  
136 elaboradas e após a execução da busca com outras palavras-chave que retornaram resultados  
137 específicos demais ou amplos demais. As palavras-chave foram utilizadas com o caractere  
138 booleano “AND”, de forma a restringir a pesquisa para materiais bibliográficos que  
139 contivessem as duas expressões. Os resultados foram filtrados para selecionar apenas países de  
140 afiliação dos autores na América Latina. O material bibliográfico foi exportado das bases,  
141 utilizando o formato “.ris” - Research Information Systems.

142 A quinta etapa, de seleção de artigos pelos títulos e resumos foi realizada com a  
143 utilização do software Parsifal. Para tanto, foram utilizados como critérios de inclusão: a)  
144 Artigos publicados em revistas ou anais de eventos nos últimos 10 anos; b) nos idiomas Inglês,  
145 Português e Espanhol; c) Tratasse do uso de sensores de baixo custo em localidades da América  
146 Latina. Como critério de exclusão foram utilizados: a) Materiais que não fossem de origem  
147 segura ex.: periódicos predatórios, ou apenas resumos de congressos; b) artigos que não  
148 tivessem como foco o uso ou análise de sensores de baixo custo.

**Comentado [A5]:** O itens (a) e (b) precisam ser reescritos para deixar o texto mais claro. No item (a) a palavra "como" poderia ser excluída. No item (b) o termo "que", após "artigos", poderia ser retirado.

**Comentado [A6]:** Qual a finalidade desse asterisco?

149 Para a sexta etapa de análise dos textos completos, seguindo o protocolo do PARSIFAL  
150 foram analisados se os artigos abordavam as seguintes perguntas: 1) Artigo que aborda, como  
151 foco, sensores de baixo custo para monitoramento ambiental? 2) Artigo publicado em  
152 inglês, português ou espanhol? 3) O artigo é referente a trabalho realizado em países da América  
153 Latina? 4) Artigo possui rigor científico, de acordo com critérios metodológicos de  
154 clareza e objetividade? Caso a resposta fosse sim a cada uma das perguntas seria atribuído 1  
155 ponto ao artigo, caso a resposta fosse parcialmente a cada uma das perguntas seria atribuída a  
156 nota 0,5, e se a resposta fosse não, então era atribuída nota zero. Dessa forma estabelecemos  
157 uma nota de corte de 2,5. Artigos com notas inferiores a 2,5 foram eliminados da revisão.

158 Para a sétima e última etapa da revisão, foi realizada a leitura e análise de todos os  
159 estudos selecionados, e para evitar vieses e ajudar na sistematização das informações utilizamos  
160 o *NotebookLm* de forma complementar para extração das informações de acordo com as  
161 perguntas realizadas.

### 162 3. RESULTADOS/ DISCUSSÕES

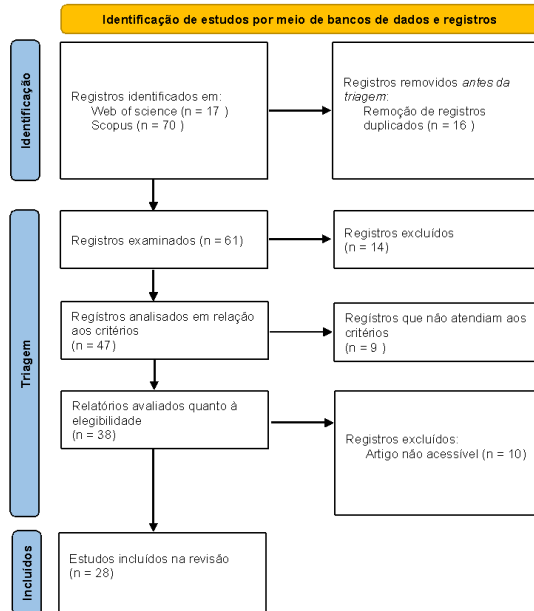
163 Ao fim da etapa quatro foram encontrados 87 estudos (70 scopus; 17 web of Science).  
164 14 estudos estavam em duplicata. Após a etapa cinco, dos 63 estudos restantes, 49 foram aceitos  
165 após a análise de títulos e resumos. Na etapa seis, a análise de qualidade, a partir das perguntas  
166 estabelecidas, mais 9 estudos foram eliminados, e ainda 10 estudos não tiveram o acesso ao  
167 material completo disponível. Dessa forma, o conjunto final de estudos que passaram a etapa  
168 sete foi constituído de 28 estudos (Figura 1).

169 *Pergunta 1 - Quais os principais sensores utilizados? Quais as marcas, fabricantes e modelos?*  
170 *Pergunta 2 - Quais as principais grandezas físicas e parâmetros analisados?*  
171

172 A análise dos 28 artigos selecionados permitiu responder às perguntas elaboradas  
173 previamente. Dos 28 artigos analisados, 25 apresentaram dados específicos sobre os modelos e  
174 fabricantes dos sensores. Nestes 25 artigos, os parâmetros relacionados a qualidade do ar mais  
175 analisados foram: Material Particulado de 2,5 (PM 2,5) em 17 artigos, Material Particulado de  
176 10 (PM 10) em 12 artigos, SO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> foram monitorados em 6 artigos, NO<sub>2</sub> e CO foram  
177 monitorados em 5 artigos, Ozônio (O<sub>3</sub>) e Material Particulado de 1 (PM 1,0) foram monitorados  
178 em 4 trabalhos, Metano (CH<sub>4</sub>) e Compostos Orgânicos Voláteis Totais (TVOC) foram  
179 monitorados em 2 trabalhos. Ainda foram registrados o monitoramento de outras variáveis  
180 ambientais em especial Temperatura (T) e Umidade Relativa (UR) em 16 trabalhos e ainda  
181 direção e velocidade do vento, iluminação (IL), radiação ultravioleta (UV) e intensidade sonora  
182 (DB) (Tabela 1).

184  
185  
186  
187  
188  
189  
190  
191  
192

Figura 1 - Diagrama de Fluxo PRISMA das etapas de identificação e seleção de estudos para revisão sistemática de literatura



193

194

195 Os principais fabricantes registrados nos trabalhos foram: Alphasense utilizada em 5  
 196 trabalhos; Sensirion e Nova Fitness utilizadas em 4 trabalhos; Bosch utilizados em 3 trabalhos;  
 197 Plantower, Winsen, Henan Hanwei, Shinyei e Sharp utilizados em 2 trabalhos; Scentroid, Spec  
 198 Sensor, Clarity, Mocon, PurpleAir, OSRAM, Iqair, Airbeam, SAINS-MART, Dylos utilizados  
 199 em ao menos 1 trabalho cada.

200 A análise desses artigos revela a diversidade de sensores e tecnologias utilizadas para  
 201 monitorar a qualidade do ar, através do uso de sensores de baixo custo. De acordo com os  
 202 artigos analisados, foram utilizados sensores de ao menos 20 fabricantes e modelos distintos.  
 203 **Importantes** destacar que destes os fabricantes: Aeroqual, AQMesh, Purple Air, Iqair e  
 204 Airbeam produzem soluções de monitoramento completas, sejam estações fixas ou portáteis  
 205 enquanto os demais vendem sensores que podem ser utilizados na montagem de diferentes  
 206 soluções de monitoramento.

207

208 Tabela 1 – Principais sensores de baixo custo utilizados para medição de qualidade do ar e parâmetros  
 209 ambientais identificados nos registros analisados.

210

Autores	Fabricantes	Modelo	Parâmetros
(Ahumada et al., 2022)	Alphasense	B4 e B43F	SO2:NO2:T:UR
(Gamboa et al., 2023)	Scentroid	DR1000L	CO;O3
(Martinez-Soto et al., 2021)	Sensirion	SPS 30	PM 2,5;PM10
(Vazquez-Vera et al., 2020)	Plantower	PMS7003 e PMS5003	PM1,0;PM2,5;PM10; T; UR

Comentado [A7]: Corrigir para o singular.

(Hernández Rodríguez et al., 2023)	Alphasense	B4 e B43F	SO2;NO2;T;UR
(Astudillo et al., 2020)	Spec		
(Laura & Nestor, 2019)	Sensors/BOSCH/Plastic Cap	SPECCO/BMP280/MQ131/MG811/MQ4	CO;O3;CO2;CH4;T;UR
(Araújo et al., 2023)	Clarity		PM2,5
(Ortiz et al., 2018)	Winsen/Henan Hanwei	MH Z16 e MG 811	CO2, T, UR
(Araújo et al., 2020)	SAINS-MART /Sharp	MQ135/GP2Y10	PM2,5;CO2, T, UR
(Candia et al., 2018)	Winsen/Henan Hanwei	MH Z16 e MG 811	CO2, T, UR
(Reece et al., 2018)	Nova Fitness/Shinyei	SDS011/SDS021/PPD42	PM2,5;PM10
(Subramanian et al., 2018)	Alphasense/MOCON	OPC-N2/Mocon piD-TECH	NO2;PM2,5;T;UR
(Romero et al., 2020)	Alphasense/Sensing	B4/CO2S-A	SO2;CO;CO2;T;UR
(Albarracín et al., 2023)	PurpleAir	PA-II-SD	PM2,5;PM10;T;UR
(Gramsch et al., 2020)	Davis AirLink/Tisch	TE-6070V	PM1,0;PM2,5;PM10; T; UR;TVOC
(Coker et al., 2022)	Dylos	DC1100 Pro	PM2,5;PM10;T;UR
(Tagle et al., 2020)	PurpleAir	PA-II-SD	PM2,5;T;UR
(Muñoz et al., 2023)	Nova Fitness	SDS011	PM2,5;PM10;T;UR
(Gramsch et al., 2021)	Sensirion	SPS 30	PM2,5
(Cardoso & Blawid, 2022)	Plantower/Nova Fitness/Sensirion	PMS 7003/SDS011/SHT30	PM2,5;PM10;T;UR
(Villanueva et al., 2023)	Sensirion/Bosch/OSRAM	SGP30/SHT31/BME680/TSL2561	TVOC;IL;T;UR
(Montalvo et al., 2022)	Iqair/AIRBeam	Airvisual/PMS7003	PM1,0;PM2,5;PM10; T; UR
(Guanochang a et al., 2018)	Alphasense		SO2;NO2;CO;O3;PM2,5;PM10;T;UR
(Lopez-Restrepo et al., 2021)	SAINS-MART/Sharp/Bosch/Hanwei	MQ7/MG811/MQ4/MQ136/MICS2714/HKA5	SO2;NO2;CO;PM2,5;PM10;CO2;CH4;TVOC
	Shinyei/Nova Fitness/Bjhike	PPD42NS/SDS011/HK-A5	SO2;O3;PM1,0;PM2,5;PM10;T;UR

211  
212  
213  
214

*Pergunta 3 - Custo Médio de Sensores de Baixo Custo para Monitoramento da Qualidade do Ar*

215 Outra informação importante que se buscou responder com essa revisão, foi sobre o  
216 custo médio deste tipo de sensor utilizado para o monitoramento da qualidade do ar. A imensa  
217 maioria dos artigos não apresenta dados sobre o custo dos sensores utilizados. Ainda assim foi  
218 possível identificar o preço para ao menos 8 sensores de diferentes fabricantes, com o preço  
219 médio de USD 672,55. O preço do sensores variou de um mínimo de USD71 da sensirion, com  
220 dois sensores um para Material Particulado (1,0;2,5; 4,0;10,0) e outro para CO2, temperatura e  
221 humidade, até o preço máximo de USD 1573 da fabricante alphasense que contém mais de 15  
222 itens entre sensores e materiais auxiliares para montagem e capacidade de monitoramento dos  
223 parâmetros Material Particulado (1,0;2,5; 4,0;10,0), CO2, NO2, SO3, O3, CO, TVOC, H2S  
224 (Tabela 2).

225 Tabela 2 - Preço de aquisição dos sensores de baixo custo para monitoramento de diferentes parâmetros de  
226 qualidade do ar.

Comentado [A8]: Inserir o espaço.

Sensores		Preço US\$		Preço BRL
IqAir Outdoor	\$	608,00	R\$	3.399,94
GAIA (Iqcn)	\$	200,00	R\$	1.118,40
Purple Air	\$	299,00	R\$	1.672,01
Clarity	\$	1.400,00	R\$	7.828,80
Winsen	\$	1.120,00	R\$	6.263,04
Airbeam	\$	119,00	R\$	665,45
Alphasense	\$	1.563,00	R\$	8.740,30
Sensirion SPS30 + SCD30	\$	71,40	R\$	399,27

227 **Nota:** \*Para conversão de dólar para real, foi utilizado o valor de R\$5.5920, como preço médio do dólar no ano de 2025. É importante destacar  
 228 que muitos desses sensores são comprados em transações internacionais que são sujeitas a tributação extra, o que pode aumentar os valores  
 229 finais para aquisição.

230 *Pergunta 4 - Quantos sensores foram utilizados por cada estudo?*

231 O estudo que utilizou a maior quantidade de sensores listados individualmente foi  
 232 Araújo et al. (2023), que utilizou um total de 22 Sensores, incluindo 18 sensores climáticos (três  
 233 unidades de seis modelos diferentes: DS18B20, AM2302, HTU21D, BMP180, BME280 e  
 234 MPL3115A2) e 4 sensores de CO2 (duas unidades de MG-811 e duas de MH-Z16). Em geral  
 235 se observa que estudos focados em Material Particulado frequentemente utilizaram múltiplas  
 236 unidades para validação ou monitoramento distribuído: Reece et al. (2018) utilizaram nove  
 237 sensores de PM2.5 (OPC-N2), além de quatro sensores de NO2 (cairclip) e quatro estações  
 238 meteorológicas (Vantage Vue). Tagle et al. (2020) implementaram sete sensores de baixo custo  
 239 do modelo SDS011 para avaliar a variabilidade entre as unidades, além de um sensor BME280  
 240 para T/U. Martinez-Soto et al. (2021) utilizaram um total de seis sensores, combinando 3  
 241 monitores de referência Met One BAM-1020 com 3 sensores de baixo custo Sensirion SPS30.  
 242 Vazquez-Vera et al. (2020) usaram cinco sensores Plantower, sendo quatro PMS7003 e um  
 243 PMS5003 como referência. Já Ahumada et al. (2022) utilizando dois módulos com quatro  
 244 sensores eletroquímicos no total, da fabricante Alphasense para gases (SO2 com B4 e NO2 com  
 245 B43F), Gamboa et al. (2023) utilizaram um monitor Scentroid DR1000L que continha os três  
 246 sensores para CO, O3 e SO2. O estudo de Ortiz et al. (2018) destacou a utilização de sensores  
 247 analógicos de baixo custo como SAINS-MART MQ135 (CO2), Sharp GP2Y10 (PM2.5) e  
 248 LM35 (Temperatura). A quantidade de sensores utilizados em cada estudo variou de acordo  
 249 com os objetivos da pesquisa e os recursos disponíveis. Alguns estudos utilizaram apenas um  
 250 ou dois sensores, enquanto outros utilizaram dezenas de sensores em redes de monitoramento  
 251 (Tabela 3).

252 Tabela 3 – Quantidade de Sensores Utilizados em cada estudo analisado.

Autores (Ano)	Variáveis Medidas	Quantidade Total de Sensores Mencionados	Marca/Modelo dos Sensores utilizados
Ahumada et al. (2022)	SO2, NO2, T/U	4 eletroquímicos + 2 T/U (Total: 6)	Alphasense B4 (SO2), Alphasense B43F (NO2)
Gamboa et al. (2023)	CO, O3, SO2	3 sensores	Monitor Scentroid DR1000L
Martinez-Soto et al. (2021)	PM2,5, PM10	6 sensores (3 referência + 3 baixo custo)	Met One BAM-1020 (referência), Sensirion SPS30 (baixo custo)
Vazquez-Vera et al. (2020)	Material Particulado (MP)	5 sensores (4 + 1 referência)	Plantower PMS7003 (4 unidades), Plantower PMS5003 (1 unidade, referência)

Araújo et al. (2023) RSL 16.pdf	CO2, T/U (referência)	<b>4 sensores de CO2</b>	MG-811 (2 unidades), MH-Z16 (2 unidades) 6 modelos climáticos (DS18B20, AM2302, HTU21D, BMP180, BME280, MPL3115A2); 2 modelos CO2 (MG-811, MH-Z16)
Araújo et al. (2023) RSL 21.pdf	T, U, P, CO2	<b>22 sensores</b> (18 climáticos + 4 CO2)	Nó analógico: SAINS-MART MQ135 (CO2), Sharp GP2Y10 (PM2.5), LM35 (T)
Ortiz et al. (2018)	CO2, PM2.5, T	Mínimo de 3 (no nó analógico); <b>quantidade total não especificada</b>	Nova SDS011, Nova SDS021, SHINYEI PPD42
Candia et al. (2018)	Material Particulado (MP)	<b>Número de unidades não informado</b>	OPC-N2 (PM2.5), cairclip (NO2), Vantage Vue (estações meteorológicas)
Reece et al. (2018)	PM2.5, NO2, Meteorológicos	<b>17 unidades</b> (9 PM2.5, 4 NO2, 4 estações)	Dylos C1100
Gramsch et al. (2020)	PM10, PM2.5	<b>10 sensores</b> (um por estação implementada) <b>7 sensores</b> SDS011 (+ BME280 e ESP8266/NodeMCU no protótipo)	SDS011 (PM), BME280 (T/U)
Tagle et al. (2020)	PM10, PM2.5, T/U	<b>Número de unidades não especificado</b>	Plantower, Nova Fitness (além do monitor de baixo custo – LCM)
Gramsch et al. (2021)	PM10, PM2.5, T, U	Utilizou <b>dois conjuntos de sensores</b> ; quantidade exata não especificada	Sensores de <b>diferentes fabricantes</b>
Villanueva et al. (2023)	PM, T, U	<b>7 sensores</b>	<b>Modelos não especificados</b>

253

254 *Perguntas 5 e 6 - Qual a abrangência da medição dos sensores? Ou até qual distância esses*  
 255 *sensores são capazes de medir a poluição?*

256 Os dados fornecidos nos artigos analisados não especificam diretamente a abrangência  
 257 ou a distância máxima de medição da maioria dos sensores de poluição mencionados. A  
 258 informação crucial sobre a área ou volume de ar que os sensores analisam para detectar  
 259 poluentes também não é apresentada. (Gramsch et al., 2020) informa que as estações instaladas  
 260 por eles tinham uma distância máxima de 5km entre elas. outros se referem ao fato que os  
 261 sensores instalados captam a qualidade do ar no ambiente ao seu redor ou que as medidas se  
 262 limitam ao seu ponto de instalação. Essa informação, assim como o número de sensores, tem  
 263 implicação direta na possibilidade de implementação de uma rede de monitoramento. Uma vez  
 264 que uma das vantagens dos sensores de baixo custo é poder gerar uma variedade de dados  
 265 especializados.

266 *Pergunta 7 - Em quais trabalhos foram montadas redes de monitoramento?*

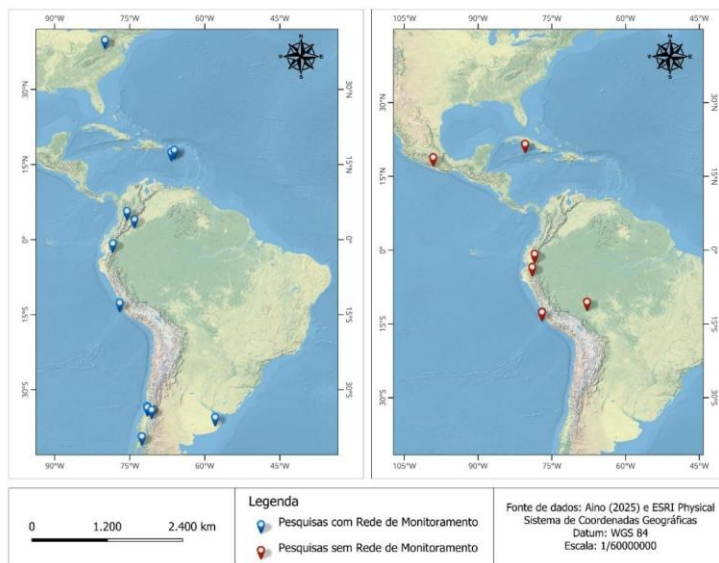
267 Considerando que a possibilidade de maior especialização na análise de dados, é um dos  
 268 principais argumentos em prol dos se LCS, procuramos analisar quais dentre os artigos  
 269 revisados, relatam casos de montagens de redes de monitoramento. Nesta revisão foram  
 270 encontrados estudos que montaram experimentos de monitoramento em 17 cidades em  
 271 diferentes países da América Latina. Dos quais 11 estudos montaram redes de monitoramento  
 272 com mais de 3 localidades sendo monitoradas simultaneamente enquanto estudos em 6

Comentado [A9]: Inserir um espaço após o ponto final.

273 localidades utilizaram experimentos de campo para comparação ou validação dos sensores  
274 utilizados (Figura 2). Essas redes variam em tamanho, tipos de sensores e objetivos de pesquisa.

275

276 Figura 2 - Mapa de Localização dos estudos com sensores de baixo custo que montaram redes de  
277 monitoramento.



278

279 Dentre as redes identificadas destacam-se o trabalho de Ahumada et al., (2022) que  
280 utilizou uma rede de quatro estações de monitoramento de referência na área industrial da Baía  
281 de Quintero, Chile, para treinar e testar módulos de sensores de baixo custo para SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub>.  
282 As estações de monitoramento de referência já existentes foram utilizadas para avaliar a  
283 performance dos sensores de baixo custo.

284 Já no trabalho de Martinez-Soto et al., (2021) foram utilizados seis sensores, três  
285 monitores de referência (BAM-1020) e três sensores de baixo custo (Sensirion SPS30) em  
286 Temuco, Chile, para investigar a relação entre temperatura e poluição do ar. Esse trabalho é  
287 parte de uma rede de 30 sensores em Temuco, desenvolvida pelo Centro de Estudos de  
288 Engenharia de Software da Universidad de La Frontera (UFRO) com apoio da prefeitura.

289 Já o trabalho de (Laura & Nestor, 2019) avaliou o desempenho de três sensores Clarity  
290 de baixo custo para PM<sub>2.5</sub> em Bogotá, Colômbia. Os sensores foram instalados nos mesmos  
291 locais de estações de referência da rede de monitoramento de Bogotá: Usaquén, Ferias e  
292 Kennedy. Embora a pesquisa tenha utilizado três sensores em diferentes locais, não fica claro  
293 se eles formavam uma rede integrada ou se operavam de forma independente.

294 No trabalho de Candia et al. (2018) foi elaborado uma rede de monitoramento da  
295 qualidade do ar baseado em uma rede LoRaWAN com sensores portáteis de baixo custo em La  
296 Plata, Argentina. Como prova de conceito, foi implementada uma rede piloto com cinco  
297 gateways LoRaWAN em diferentes pontos da região da Grande La Plata.

298 Outro trabalho foi o de Gramsch et al. (2020) onde foi implementada uma rede de dez  
299 sensores Dylos de baixo custo em Concón, Chile, para mapear a concentração de PM<sub>2.5</sub> na

300 cidade. A rede foi instalada em casas de moradores e locais públicos, fornecendo dados sobre  
301 a variação espacial e temporal da poluição.

302 No trabalho de Muñoz et al. (2023), os pesquisadores construíram uma rede de 21  
303 sensores do modelo Sensirion SPS30 que foram calibrados e utilizados para medir PM2.5 em  
304 Temuco, Chile. Os sensores foram instalados em diferentes locais da cidade, incluindo  
305 escritórios públicos, escolas e residências, com o objetivo de coletar dados sobre a poluição por  
306 fumaça de madeira em diferentes setores.

307 Já Lopez-Restrepo et al., (2021) utilizaram uma rede hiperdensa de baixo custo com 255  
308 sensores de PM2.5 no Vale do Aburrá, Colômbia. A rede, desenvolvida pelo projeto SIATA,  
309 abrange Medellín e sua área metropolitana, complementando a rede oficial de monitoramento  
310 de alta qualidade. Os sensores da rede de baixo custo estão localizados em casas e instituições,  
311 fornecendo uma alta densidade de dados para análise da qualidade do ar.

312 É importante destacar que a definição de "rede de monitoramento" pode variar entre os  
313 estudos. Alguns trabalhos utilizaram redes pré-existentes como referência, enquanto outros  
314 implementaram suas próprias redes com sensores de baixo custo. As informações sobre a  
315 quantidade de sensores, sua distribuição espacial e o período de monitoramento variam entre  
316 os estudos. É fundamental considerar o contexto de cada pesquisa, os objetivos específicos e  
317 as limitações de cada rede de monitoramento para interpretar os resultados.

318 Ressaltamos ainda que existem redes globais de sensores de baixo custo como as mantidas  
319 pela Iqair<sup>1</sup> e a aqicn<sup>2</sup>. Essas redes apresentam milhares de sensores espalhados de maneira  
320 heterogênea pelo mundo. E permitem o acesso aos dados dos parâmetros de qualidade do ar em  
321 diferentes níveis. Isso demonstra que a implementação de redes de monitoramento com  
322 sensores de baixo custo apresenta um grande potencial para ampliar a compreensão da  
323 qualidade do ar em diferentes contextos, especialmente em áreas com poucos dados de  
324 monitoramento oficial.

325  
326 *Pergunta 8 - Quais são os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho dos sensores de*  
327 *baixo custo? E quais Sensores de Referência e duração das Comparações de Dados?*

328  
329 Apesar da importância dos sensores de baixo custo, cada dia mais evidente. Um ponto de  
330 extrema importância é a validação dos dados gerados. Por isso, diversos parâmetros são  
331 utilizados para avaliar o desempenho desses sensores no monitoramento da qualidade do ar.  
332 Esses parâmetros ajudam a determinar a precisão, a confiabilidade e a adequação dos sensores.

333 Entre os parâmetros utilizados, os artigos aqui consultados ressaltam: 1) A precisão: que  
334 indica a dispersão das medidas obtidas pelo sensor em torno de um valor médio. Sensores com  
335 alta precisão produzem medidas com pouca variação; 2) O Viés: representa a diferença  
336 sistemática entre a medida média do sensor e o valor real da concentração do gás. Um viés alto  
337 indica que o sensor está superestimando ou subestimando a concentração do gás. 3) Exatidão:  
338 reflete a proximidade das medidas do sensor em relação ao valor real da concentração do gás.  
339 É influenciada tanto pela precisão quanto pelo viés.

340 Considerando a imperatividade da calibração dos LCS, buscamos identificar como foi  
341 feita essa calibração nos estudos analisados. Dentre os artigos que realizaram algum tipo de  
342 calibração, cinco estudos utilizaram métodos de regressão linear, em geral comparando os  
343 dados dos LCS com os dados de sensores de referência. Dois trabalhos utilizaram algoritmos  
344 de Machine Learning ou Redes Neurais para comparação dos dados dos LCS com dados de  
345 sensores de referência, e ao menos um trabalho utilizou um método experimental com análise  
346 de uma quantidade conhecida de gases em uma câmara hermética (Tabela 4).

<sup>1</sup> <https://www.iqair.com/air-quality-map?lat=-8.00889&lng=-34.8553&zoomLevel=10>

<sup>2</sup> <https://aqicn.org/>

Comentado [A10]: Verificar pontuação.

347 O uso da Regressão Linear Múltipla se apresentou como método eficaz para melhorar as  
348 medições de gases como SO<sub>2</sub> e NO<sub>2</sub> no estudo de Ahumada et al. (2022). Essa calibração  
349 reduziu desvios e tornou os dados mais confiáveis. Também foi possível identificar o uso de  
350 Redes Neurais como método que apresentou melhora considerável na calibração de sensores  
351 Dyls para PM<sub>2.5</sub> em comparação com o monitor BAM, aumentando a correlação de 0,638  
352 para 0,742 e diminuindo o nRMSE (Gramsch et al., 2020). Já o uso do Machine Learning tenha  
353 aprimorado ligeiramente a precisão dos sensores de CO<sub>2</sub>, ela não garantiu o atendimento aos  
354 parâmetros nominais (Araújo et al., 2023).

355 A calibração destes dados é de suma importância no caso dos LCS em função da  
356 influência de fatores ambientais, da composição do material particulado (MP) e da Umidade  
357 Relativa (UR). Tagle et al. (2020) observaram viés considerável nas medições de PM<sub>2.5</sub>:  
358 superestimação quando a UR excedia 75% e subestimação quando a UR estava abaixo de 50%.  
359 Em relação a temperatura, Ahumada et al. (2022) confirmaram que a temperatura afeta a  
360 precisão. Além disso, Romero et al. (2020) notaram que a temperatura era um parâmetro  
361 meteorológico mais influente do que a umidade relativa. Em relação específica a composição  
362 do MP, a correlação entre os LCS e os instrumentos padrão varia muito dependendo da  
363 composição das partículas. Locais com maior concentração de sulfato, nitrato ou SO<sub>2</sub>  
364 apresentaram baixa correlação, enquanto aqueles com carbono orgânico e carbono negro  
365 mostraram melhor correlação.

366 Ainda no que diz respeito a validação dos dados de LCS, há a necessidade de exposição  
367 destes as variações do ambiente. Por isso, os estudos apresentam uma grande variação na  
368 duração das comparações. Foi possível identificar estudos que buscaram uma validação de  
369 longo Prazo, como o artigo de Laura & Nestor (2019) que utilizaram dados coletados por 4  
370 meses para comparar os sensores Clarity. E no estudo de Araújo et al. (2023) que conduziram  
371 um experimento de campo de longa duração por aproximadamente seis meses (Agosto/2016 a  
372 Fevereiro/2017). Já o estudo de calibração com um experimento em câmaras herméticas, como  
373 o artigo de Martinez-Soto et al. (2021), foi concluído em apenas 8 horas. Por outro lado, o  
374 treinamento de Sensores (de gases específicos, como o NO<sub>2</sub> realizado por Ahumada et al.  
375 (2022), exigiu períodos de 25 a 45 dias.

376  
377

**Comentado [A11]:** Revisar a escrita desse trecho para que a frase faça sentido. Sugiro a troca do termo "Já" por "Embora".

378  
379  
380

Tabela 4 - Comparação entre os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho dos sensores de baixo custo com Sensores de Referência do tempo de análise

Autores (Ano)	Parâmetro de Avaliação	Sensor de Baixo Custo (LCS)	Sensor de Referência	Método Estatístico / Calibração	Resultado dos Modelos Estatísticos	Tempo de Duração
Gamboa et al. (2023)	CO, O3, SO2; Desvio de linha de base, linearidade, precisão, viés, exatidão, interferência.	DR1000L (Scentroid)	Analísadores Thermo Scientific Séries I e IQ (FRM certificado pela EPA)	Linearidade (R <sup>2</sup> ADJ), Precisão, Viés	<b>Excelente linearidade (R<sup>2</sup>ADJ ~1)</b> , Alta precisão (>89%), Baixo viés. Interferência cruzada.	60 dias
Ahumada et al. (2022)	SO2, NO2. Efeito de Temperatura/Umidade (T/U) na precisão.	Alphasense SO <sub>2</sub> -B4, Alphasense NO <sub>2</sub> -B43F	Thermo Scientific 43i (SO2) e 42i (NO2)	Regressão Linear Múltipla (MLR).	MLR melhorou significativamente as medições. A calibração reduziu desvios.	Treinamento de NO2: 25 dias e SO2 45 dias.
Araújo et al. (2023)	CO2; Desempenho e precisão com e sem calibração.	Sensores de CO2 (e.g., MG-811, MH-Z16)	Instrumento Vaisala GM70 com sonda de CO2	Machine Learning (ML), Regressão Linear.	Aprimorou ligeiramente a precisão.	Experimentos de exposição: 45 horas. Experimento de campo: 7 meses
Gramsch et al. (2020)	PM2.5; Necessidade de calibração <i>in situ</i> .	Dylos	Monitor BAM	Rede Neural	Rede Neural melhorou a correlação (de 0,638 para 0,742).	Duração não especificada.
Romero et al. (2020)	PM2.5, PM10, T, UR; Correlação entre dados do sensor e referência.	PurpleAir	Medições de referência	Correlação (r <sup>2</sup> )	Bom desempenho para PM, mas não para T/UR.	Duração não especificada.
Laura & Nestor (2019)	PM2.5; Comparação sob condições de umidade variável.	Sensores Clarity	Estações de referência da rede de Bogotá	Dois modelos de regressão	Resultados variaram entre ruim e regular.	4 meses (Nov/2018 a Mar/2019), dados horários.
Tagle et al. (2020)	PM2.5, PM10, UR; Variabilidade entre unidades e viés relacionado à UR.	SDS011 (PM), BME280 (T/U)	Dados de referência	Análise de Linearidade, Viés (médias de 24h e 1h).	Desempenho adequado para PM2.5 (superestimação se UR > 75%; subestimação se UR < 50%).	Duração não especificada.
Martinez-Soto et al. (2021)	PM2.5, PM10; Calibração.	Sensirion SPS30	Espectrômetro de aerossol a laser Grimm 11-E	Calibração em câmara hermética	Resultados estatísticos não detalhados.	8 horas (calibração em câmara hermética).
Coker et al. (2022)	PM2.5; Associação com hospitalizações respiratórias.	Sensores de baixo custo (não especificado)	Não especificado	Comparação de valores brutos vs. Corrigidos (fórmula USEPA)	Associações mais fortes para concentrações corrigidas	Duração não especificada.

381

382 **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

383 A elaboração dessa revisão sistemática de literatura permitiu responder a quase todas as  
 384 perguntas elaboradas em seu escopo. Identificamos que os principais sensores utilizados nos  
 385 artigos revisados foram das marcas Alphasense (utilizados em 5 trabalho), Sensirion e Nova  
 386 Fitness (Utilizados em 4 trabalhos). Destacando que estes são equipamentos cujos sensores  
 387 precisam ser montados e não soluções prontas para uso.

388 Também foi possível destacar que as principais grandezas físicas analisadas foram  
 389 Material Particulado de 2,5 (PM 2,5) em 17 artigos, Material Particulado de 10 (PM 10) em 12  
 390 artigos, SO<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> em 6 artigos, NO<sub>2</sub> e CO em 5 artigos, Ozônio (O<sub>3</sub>) e Material Particulado  
 391 de 1 (PM 1,0) em 4 trabalhos, Metano (CH<sub>4</sub>) e Compostos Orgânicos Voláteis Totais (TVOC)  
 392 foram monitorados em 2 trabalhos. Esses dados ressaltam que o PM<sub>2,5</sub> além de considerado  
 393 hoje o poluente de maior importância para a saúde humana, é também o mais monitorado. Esses  
 394 resultados parecem destacar esse movimento de preocupação em entender a situação atual de  
 395 exposição a poluição por PM 2,5. Mas também evidenciam a lacuna em relação ao  
 396 monitoramento dos demais poluentes atmosféricos. Evidenciando aí um potencial lacuna de  
 397 conhecimento e campo aberto para novas pesquisas.

398 Nossos resultados também evidenciaram um dado pouco divulgado, mas fundamental  
 399 para essa área de atuação que se baseia no uso de sensores de baixo custo. Nosso levantamento  
 400 mostrou que esses sensores podem custar entre USD 71 e USD 1500. Valores que em se  
 401 considerando a realidade do sul global, das iniciativas de ciência cidadã e do subfinanciamento  
 402 de instituições de pesquisas, podem inviabilizar o uso mesmo destes sensores de baixo custo.  
 403 Esse dado também lança luz sobre uma potencial explicação para a maior utilização de sensores  
 404 para PM 2,5, uma vez que estes em geral apresentam um custo menor que os sensores de outros  
 405 gases como NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, ou O<sub>3</sub>.

406 Uma pergunta que não conseguimos responder com essa revisão foi a abrangência destes  
 407 sensores. Não encontramos informações sobre qual distância estes sensores são capazes de  
 408 captar a emissão dos poluentes que se propõem a medir. Essa é uma questão fundamental,  
 409 apesar de compreensível a não existência de um dado exato, em função da influência das  
 410 características do ambiente natural e construído que podem influenciar. Ainda assim,  
 411 considerando que a possibilidade de medição em um maior número de áreas por seu custo mais  
 412 baixo, se faz importante saber a que distância esses sensores devem estar para que consigam  
 413 ser custo-efetivos em seu uso e na criação de redes de monitoramento que democratizem o  
 414 acesso a informação.

415 E nesse sentido, nossos resultados demonstraram que ao menos 11 cidades na América  
 416 Latina, já tem alguma rede de monitoramento utilizando sensores de baixo custo. Nesse ponto  
 417 é fundamental destacar que outras redes com sensores de baixo custo são conhecidas tanto no  
 418 âmbito da América Latina, como globais. Por isso, apesar de sabidamente nesta região termos  
 419 uma grande lacuna de monitoramento da qualidade do ar, algumas iniciativas já estão se  
 420 formando. Em geral por ações de Universidades e Organizações da Sociedade Civil.

421 No entanto se faz necessário a advertência de que os sensores de baixo custo geralmente  
 422 apresentam menor precisão e confiabilidade em comparação com os equipamentos de  
 423 referência. E que suas leituras podem ser afetadas por fatores ambientais como temperatura,  
 424 umidade, interferência de outros gases e envelhecimento do sensor. E, portanto, a calibração  
 425 dos sensores de baixo custo é essencial para garantir a qualidade dos dados, e essa calibração  
 426 pode ser complexa e demandar tempo e recursos, o que destaca a necessidade de participação  
 427 de técnicos capacitados mesmo em iniciativas de ciência cidadã. Além disso esses podem exigir  
 428 manutenção e substituição mais frequentes do que os equipamentos de referência,

**Comentado [A12]:** Excluir essa letra "f".

**Comentado [A13]:** Melhorar esse trecho. Seria a distância em relação às fontes dos poluentes. Os sensores em si não captam a emissão dos poluentes mas podem indicar quais as fontes de poluição nas proximidades. Nesse caso, a intenção do texto é afirmar que os artigos analisados não foram capazes de responder qual o raio de alcance desses sensores em relação aos poluentes emitidos por fontes próximas.

**Comentado [A14]:** Distância em relação às fontes?

**Comentado [A15]:** à

**Comentado [A16]:** Não iniciar o parágrafo com a conjunção "e".

**Comentado [A17]:** Retirar a vírgula

**Comentado [A18]:** Inserir uma vírgula após a palavra "ponto".

**Comentado [A19]:** Inserir vírgula após "No entanto".

**Comentado [A20]:** Retirar o "E".

**Comentado [A21]:** Ajustar a pontuação para evitar o uso do "e" várias vezes na mesma frase.

**Comentado [A22]:** Vírgula após "Além disso".

429 especialmente em ambientes externos e ainda existe uma falta de padronização entre os  
430 fabricantes que pode dificultar a comparação de dados e a integração de diferentes plataformas.  
431 Ainda assim, é inegável que os sensores de baixo custo para monitoramento da qualidade  
432 do ar apresentam um grande potencial para complementar as redes de monitoramento  
433 tradicionais, especialmente em países em desenvolvimento. No entanto, é crucial entender as  
434 vantagens e desvantagens desses sensores em comparação com os equipamentos de referência.

## 435 5. REFERÊNCIAS

- 436 AHUMADA, S., TAGLE, M., VASQUEZ, Y., DONOSO, R., LINDÉN, J., HALLGREN, F.,  
437 SEGURA, M., & OYOLA, P. Calibration of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> Electrochemical Sensors via a  
438 Training and Testing Method in an Industrial Coastal Environment. **Sensors**, 22(19). 2022.  
439 <https://doi.org/10.3390/s22197281>
- 440 ALBARRACÍN, K. Y. A., CONSUEGRA, A. A., & AGUILAR-ARIAS, J. Particulate matter  
441 10 µm (PM<sub>10</sub>), 2.5 µm (PM<sub>2.5</sub>) datasets gathered by direct measurement, low-cost sensor  
442 and by public air quality stations in Fontibón, Bogotá D.C., Colombia. **Data in Brief**, 2023(49),  
443 109323. 2023. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.6439400.v7>
- 444 ARAÚJO, T., SILVA, L., AGUIAR, A., & MOREIRA, A. Calibration Assessment of Low-  
445 Cost Carbon Dioxide Sensors Using the Extremely Randomized Trees Algorithm. **Sensors**,  
446 23(13).2023. <https://doi.org/10.3390/s23136153>
- 447 ARAÚJO, T., SILVA, L., & MOREIRA, A. Evaluation of Low-Cost Sensors for Weather and  
448 Carbon Dioxide Monitoring in Internet of Things Context. **Internet of Things**, 1(2), 286–308.  
449 2020. <https://doi.org/10.3390/iot1020017>
- 450 ASTUDILLO, G. D., GARZA-CASTANON, L. E., & MINCHALA AVILA, L. I. Design and  
451 Evaluation of a Reliable Low-Cost Atmospheric Pollution Station in Urban Environment.  
452 **IEEE Access**, 8, 51129–51144.2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2980736>
- 453 CANDIA, A., REPRESA, S. N., GIULIANI, D., LUENGO, M. A., PORTA, A. A., &  
454 MARRONE, L. A. Solutions for SmartCities: Proposal of a monitoring system of air quality  
455 based on a LoRaWAN network with low-cost sensors. **Congreso Argentino de Ciencias de**  
456 **La Informatica y Desarrollos de Investigacion, CACIDI**. 2018.  
457 <https://doi.org/10.1109/CACIDI.2018.8584183>
- 458 CARDOSO, F., & BLAWID, S. Monitoring the Daily Rhythm of Total Green Leaf Volatiles  
459 with a Low-Cost Multi-Sensor Node. 2022 **Symposium on Internet of Things, SIoT 2022**.  
460 <https://doi.org/10.1109/SIoT56383.2022.10069883>
- 461 COKER, E. S., BURALLI, R., MANRIQUE, A. F., KANAI, C. M., AMEGAH, A. K., &  
462 Gouveia, N. Association between PM<sub>2.5</sub> and respiratory hospitalization in Rio Branco, Brazil:  
463 Demonstrating the potential of low-cost air quality sensor for epidemiologic research.  
464 **Environmental Research**, 214(214).2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113738>
- 465 GAMBOA, V. S., KINAST, É. J., & PIRES, M. System for performance evaluation and  
466 calibration of low-cost gas sensors applied to air quality monitoring. **Atmospheric Pollution**  
467 **Research**, 14(2).2023. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101645>
- 468 GRAMSCH, E., MORALES, L., BAEZA, M., AYALA, C., SOTO, C., NEIRA, J., PÉREZ, P.,  
469 & MORENO, F. Citizens' surveillance micro-network for the mapping of PM<sub>2.5</sub> in the city of

Comentado [A23]: Ajustar esse trecho para retirar esse "e".

- 470 Concón, Chile. **Aerosol and Air Quality Research**, 20(2), 358–368.2020.  
471 <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0179>
- 472 GRAMSCH, E., OYOLA, P., REYES, F., VÁSQUEZ, Y., RUBIO, M. A., SOTO, C., PÉREZ,  
473 P., MORENO, F., & GUTIÉRREZ, N. Influence of Particle Composition and Size on the  
474 Accuracy of Low Cost PM Sensors: Findings From Field Campaigns. **Frontiers in**  
475 **Environmental Science**, 9 (November 2021).2021.  
476 <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.751267>
- 477 GUANOCHANGA, B., CACHIPUENDO, R., FUERTES, W., BENÍTEZ, D. S.,  
478 TOULKERIDIS, T., TORRES, J., VILLACÍS, C., TAPIA, F., & MENESES, F. Towards a  
479 Real-Time Air Pollution Monitoring Systems Implemented using Wireless Sensor Networks:  
480 Preliminary Results. 2018 **IEEE Colombian Conference on Communications and**  
481 **Computing (COLCOM)**.2018.
- 482 HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, E., MARTÍNEZ, A., SCHALM, O., AMALIA GONZÁLEZ  
483 RIVERO, R., & HERNÁNDEZ SANTANA, L. Diseño de un sistema de medición y monitoreo  
484 de variables asociadas a calidad del aire. **RIELAC**, 44(2), 2304.2023. 2023.  
485 <https://riela.cujae.edu.cu/index.php/riela/article/view/933>
- 486 HERNÁNDEZ-GORDILLO, A., RUIZ-CORREA, S., ROBLEDO-VALERO, V.,  
487 HERNÁNDEZ-ROSALES, C., & ARRIAGA, S. Recent advancements in low-cost portable  
488 sensors for urban and indoor air quality monitoring. **Air Quality, Atmosphere and Health**,  
489 14(12), 1931–1951.2021. <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01067-x>
- 490 IQAIR. **World Air Quality Report**. 2023. Disponível em: [https://www.iqair.com/world-most-](https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries)  
491 [polluted-countries](https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries)
- 492 KORTOÇI, P., MOTLAGH, N. H., ZAIDAN, M. A., FUNG, P. L., VARJONEN, S.,  
493 REBEIRO-HARGRAVE, A., NIEMI, J. V., NURMI, P., HUSSEIN, T., PETÄJÄ, T.,  
494 KULMALA, M., & TARKOMA, S. (2022). Air pollution exposure monitoring using portable  
495 low-cost air quality sensors. **Smart Health**, 23, 100241.  
496 <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2021.100241>
- 497 LAURA, R., & NESTOR, R. . Evaluation of the performance of low-cost sensors as a  
498 complement to the Bogotá Air Quality Monitoring Network. **Conference Proceedings -**  
499 **Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Publica,**  
500 **CASAP 2019**, 2019-January.2019. <https://doi.org/10.1109/CASAP48673.2019.9364031>
- 501 LI, J., MATTEWAL, S. K., PATEL, S., & BISWAS, P. (2020). Evaluation of nine low-cost-  
502 sensor-based particulate matter monitors. **Aerosol and Air Quality Research**, 20(2), 254–270.  
503 <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.12.0485>
- 504 LOPEZ-RESTREPO, S., YARCE, A., PINEL, N., QUINTERO, O. L., SEGERS, A., &  
505 HEEMINK, A. W. Urban air quality modeling using low-cost sensor network and data  
506 assimilation in the aburrá valley, colombia. **Atmosphere**, 12(1). 2021.  
507 <https://doi.org/10.3390/ATMOS12010091>
- 508 MARTINEZ-SOTO, A., AVENDAÑO VERA, C. C., BOSO, A., HOFFLINGER, A., &  
509 SHUPLER, M. Energy poverty influences urban outdoor air pollution levels during COVID-  
510 19 lockdown in south-central Chile. **Energy Policy**, 158, 112571.2021.  
511 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112571>

- 512 MONTALVO, L., FOSCA, D., PAREDES, D., ABARCA, M., SAITO, C., & VILLANUEVA,  
513 E. (2022). An Air Quality Monitoring and Forecasting System for Lima City With Low-Cost  
514 Sensors and Artificial Intelligence Models. **Frontiers in Sustainable Cities**, 4.  
515 <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.849762>
- 516 MUÑOZ, C., HUIRCAN, J., JARAMILLO, F., & BOSO, Á. Calibration of Sensor Network  
517 for Outdoor Measurement of PM2.5 on High Wood-Heating Smoke in Temuco City. **Processes**,  
518 11(8).2023. <https://doi.org/10.3390/pr11082338>
- 519 ORTIZ, D., BENITEZ, D. S., FUERTES, W., & TORRES, J. On the Use of Low Cost Sensors  
520 for the Implementation of a Real-Time Air Pollution Monitoring System Using Wireless Sensor  
521 Networks. **IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing**  
522 **(ROPEC)** 2018.
- 523 REECE, S., WILLIAMS, R., COLÓN, M., HUERTAS, E., O'SHEA, M., SHERIDAN, P.,  
524 SOUTHGATE, D., PORTUONDO, G., DÍAZ, N., & WYRZYKOWSKA, B. Spatial-Temporal  
525 Analysis of PM2.5 and NO2 Concentrations Collected Using Low-Cost Sensors in Peñuelas,  
526 Puerto Rico. **Sensors**, 2018(18), 4937.2018. <https://doi.org/10.3390/ecs4-4-04937>
- 527 ROMERO, Y., VELÁSQUEZ, R. M. A., & NOEL, J. Development of a multiple regression  
528 model to calibrate a low-cost sensor considering reference measurements and meteorological  
529 parameters. **Environmental Monitoring and Assessment**, 192(8). 2020.  
530 <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08440-w>
- 531 SUBRAMANIAN, R., ELLIS, A., TORRES-DELGADO, E., TANZER, R., MALINGS, C.,  
532 RIVERA, F., MORALES, M., BAUMGARDNER, D., PRESTO, A., & MAYOI-BRACERO,  
533 O. L.. Air quality in Puerto Rico in the aftermath of Hurricane Maria: A case study on the use  
534 of lower-cost air quality monitors. **ACS Earth and Space Chemistry**, 2(11). 2018 DOI:  
535 10.1021/acsearthspacechem.8b00079
- 536 TAGLE, M., ROJAS, F., REYES, F., VÁSQUEZ, Y., HALLGREN, F., LINDÉN, J., KOLEV,  
537 D., WATNE, Å. K., & OYOLA, P. (2020). Field performance of a low-cost sensor in the  
538 monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. **Environmental Monitoring and**  
539 **Assessment**, 192(3).2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4>
- 540 TAVELLA, R. A., DE MOURA, F. R., MIRAGLIA, S. G. E. K., & DA SILVA JÚNIOR, F.  
541 M. R. A New Dawn for Air Quality in Brazil. In *The Lancet Planetary Health* (Vol. 8, Issue 10,  
542 pp. e717–e718). **Elsevier B.V.**2024. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(24\)00203-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00203-1)
- 543 VAZQUEZ-VERA, J. L., ESPINOSA-CALDERON, A., DIAZ-CARMONA, J., LOPEZ-  
544 FARIAS, R., & HERNANDEZ-PANIAGUA, I. Y. Design of a Low-cost Air Quality Remote  
545 Monitoring System based on IOT and Sensor Sensitivity Validation. **2020 IEEE International**  
546 **Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, ROPEC**. 2020.  
547 <https://doi.org/10.1109/ROPEC50909.2020.9258685>
- 548 VILLANUEVA, E., ESPEZUA, S., CASTELAR, G., DIAZ, K., & INGAROCA, E. Smart  
549 Multi-Sensor Calibration of Low-Cost Particulate Matter Monitors. **Sensors**, 23(7).2023.  
550 <https://doi.org/10.3390/s23073776>
- 551 **WORLD BANK. The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action**  
552 **Beyond 2021** (Vol. 1). The World Bank.2022. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1816-5>

Sobrenome, Nome; *et al*; Título do Artigo. ES Engineering and Science, (ano), (edição).

553 YADUMA, N., KORTELAJNEN, M., & WOSSINK, A. (2013). Estimating Mortality and  
554 Economic Costs of Particulate Air Pollution in Developing Countries: The Case of Nigeria.  
555 **Environmental and Resource Economics**, 54(3), 361–387.2013.  
556 <https://doi.org/10.1007/s10640-012-9598-7>

557  
558



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.