

SENSORES FLUORESCENTES APLICADOS AO MONITORAMENTO AMBIENTAL DE CONTAMINANTES EMERGENTES: UMA ANÁLISE CRÍTICA DE ESTRATÉGIAS ANALÍTICAS E LIMITAÇÕES OPERACIONAIS

Discente: Wallace Henrique Cardoso Peres*

Orientadora: Weida Rodrigues Silva

Resumo: Contaminantes emergentes (CEs) correspondem a uma ampla classe de compostos químicos provenientes de atividades industriais, agrícolas, farmacêuticas e de uso doméstico, cuja presença crescente em matrizes ambientais tem despertado preocupação devido aos potenciais riscos ecotoxicológicos e à limitada regulamentação. O monitoramento desses compostos impõe desafios analíticos relevantes, associados à diversidade química, à ocorrência em concentrações traço e à complexidade das matrizes ambientais. Técnicas instrumentais consolidadas, como cromatografia acoplada à espectrometria de massas, são amplamente empregadas na análise de CEs devido à elevada sensibilidade e seletividade, porém demandam infraestrutura especializada, preparo extensivo de amostras e elevados custos operacionais. Nesse contexto, sensores fluorescentes têm sido amplamente investigados como estratégias analíticas alternativas para detecção rápida e monitoramento contínuo, com potencial simplificação instrumental e redução de custos, embora sua aplicação ambiental real permaneça condicionada a limitações analíticas e operacionais. Assim, este trabalho apresenta uma revisão narrativa crítica da literatura recente (2020-2026) sobre sondas fluorescentes e materiais luminescentes aplicados à detecção de CEs, organizada a partir de critérios analíticos relacionados ao reconhecimento químico, à transdução fluorescente e ao nível de integração da plataforma sensorial analítica. São discutidas, de forma comparativa, diferentes estratégias sensoriais, incluindo sistemas baseados em reconhecimento molecular, sensores ratiométricos, sensores fluorescentes simples e materiais híbridos multifuncionais, com ênfase em seletividade analítica, robustez óptica, efeito de matriz e validação ambiental. A comparação com métodos convencionais evidencia que sensores fluorescentes não constituem substitutos diretos de técnicas instrumentais consolidadas, mas ferramentas complementares para triagem, monitoramento contínuo e alerta precoce. Conclui-se que essas plataformas apresentam elevado potencial para aplicações ambientais, desde que acompanhadas de validações realistas em diferentes matrizes ambientais.

Palavras-chave: sensores fluorescentes; contaminantes emergentes; monitoramento ambiental; métodos analíticos

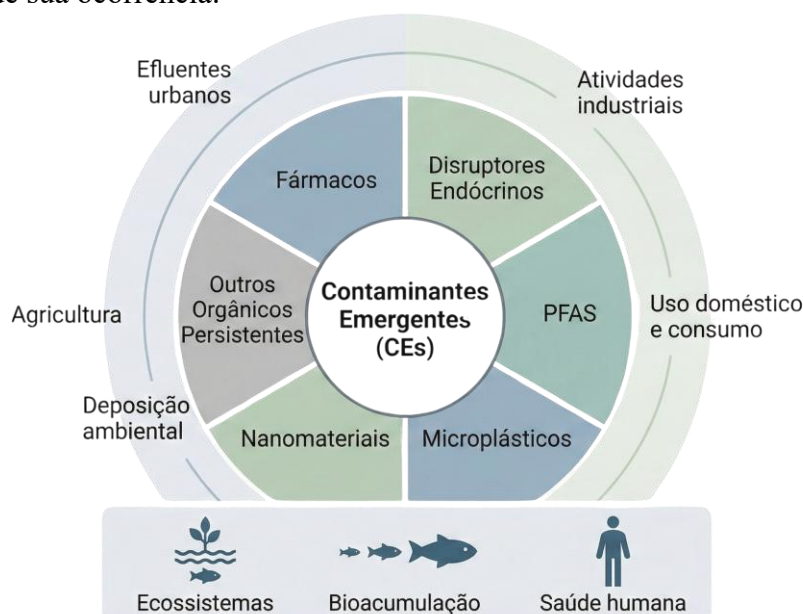
* Instituto de Química – UFCAT: wallace.henrique@discente.ufcat.edu.br; weidarodrigues@gmail.com

1 – INTRODUÇÃO

O avanço contínuo das atividades industriais, aliado ao uso intensivo de insumos agrícolas e substâncias de interesse farmacêutico, tem ampliado a presença de compostos químicos em diferentes matrizes ambientais, incluindo sistemas aquáticos e terrestres. Parte desses compostos não é adequadamente monitorada ou removida pelos sistemas convencionais de tratamento, sendo classificada como Contaminantes Emergentes (CEs) (Li, Xingyu et al., 2024). Essa denominação abrange um conjunto heterogêneo de substâncias, frequentemente detectadas em concentrações traço, cuja ocorrência está associada a múltiplas fontes antrópicas e a diferentes vias de introdução no ambiente.

Os CEs englobam classes amplas de compostos com naturezas químicas e funções distintas, incluindo fármacos, disruptores endócrinos, substâncias per- e polifluoroalquiladas (PFAS), microplásticos, nanomateriais, além de outros compostos orgânicos persistentes amplamente reportados na literatura (Li, Xingyu et al., 2024; Khan et al., 2022). A diversidade estrutural e funcional dessas classes, bem como a sobreposição entre categorias, dificulta abordagens analíticas e impõe desafios adicionais ao monitoramento ambiental. A Figura 1 apresenta uma organização conceitual dessas classes, juntamente com as principais fontes e vias ambientais associadas à ocorrência dos CEs.

Figura 1. Organização conceitual dos contaminantes emergentes, destacando classes amplas de compostos, principais fontes e vias ambientais associadas, bem como o contexto ecológico e biológico de sua ocorrência.



Fonte: O autor (2025)

A ocorrência de CEs em ambientes aquáticos e terrestres tem despertado crescente interesse devido ao seu potencial de persistência, mobilidade ambiental e possibilidade de bioacumulação ao longo da cadeia alimentar. Embora a disponibilidade de dados toxicológicos abrangentes ainda seja limitada para muitos desses compostos, estudos de ocorrência e remoção têm apontado preocupações relacionadas a possíveis efeitos crônicos em organismos expostos, incluindo alterações endócrinas, neurotoxicidade, resistência antimicrobiana e outros impactos observados em diferentes níveis tróficos (Rathi; Kumar; Show, 2021). Nesse contexto, a presença difusa desses contaminantes em ecossistemas naturais e antrópicos reforça a necessidade de estratégias analíticas capazes de acompanhar sua ocorrência em matrizes ambientais complexas.

Do ponto de vista analítico, técnicas instrumentais consolidadas, como a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em tandem (do inglês *Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry*, LC-MS/MS), a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (do inglês *Gas Chromatography-Mass Spectrometry*, GC-MS) e a cromatografia líquida de alta eficiência (do inglês *High-Performance Liquid Chromatography*, HPLC), são amplamente empregadas na identificação e quantificação de CEs, permanecendo como técnicas de referência em termos de sensibilidade, seletividade e confiabilidade, sendo amplamente adotadas em métodos oficiais de análise. Entretanto, tais abordagens demandam infraestrutura especializada, custos operacionais elevados e etapas analíticas extensas, envolvendo preparo de amostra, separação cromatográfica e detecção por instrumentação analítica avançada. Essas características limitam sua aplicação em monitoramentos ou em tempo quase real, especialmente quando avaliados sob critérios de sustentabilidade e custo analítico (Pena-Pereira; Wojnowski; Tobiszewski, 2020). Como consequência, cresce o interesse por estratégias analíticas alternativas, especialmente aquelas voltadas ao monitoramento rápido, de campo ou próximo ao ponto de amostragem, com menor custo operacional.

Nesse cenário, a fluorescência tem sido amplamente explorada como técnica analítica alternativa, sendo utilizada como mecanismo de transdução em diferentes sondas moleculares e materiais emissores. Essa técnica oferece elevada sensibilidade, resposta rápida e potencial de integração com dispositivos miniaturizados, incluindo plataformas ópticas portáteis de leitura e sistemas baseados em smartphones (Li, Yiqi et al., 2024). Estratégias envolvendo corantes clássicos, *quantum dots*, *carbon dots*, nanopartículas funcionalizadas e polímeros molecularmente impressos fluorescentes têm sido propostas para a detecção seletiva de CEs, apresentando mecanismos de resposta distintos e níveis variados de robustez analítica (Rani et

al., 2020; Ren, 2025; Sahu et al., 2025; Shanmugaraju et al., 2023). Essas abordagens têm se mostrado promissoras para aplicações em monitoramento ambiental, especialmente em cenários que demandam rapidez, portabilidade e baixo custo, embora o desafio central permaneça na obtenção de seletividade adequada e na manutenção da resposta analítica frente à complexidade e variabilidade das matrizes ambientais.

Diante desse contexto, este trabalho apresenta uma revisão narrativa crítica (2020–2026) sobre sondas fluorescentes e materiais luminescentes aplicados à detecção de CEs. A análise é estruturada a partir de eixos conceituais e funcionais, abrangendo fundamentos fotofísicos, mecanismos de resposta e estratégias sensoriais, com ênfase em seletividade analítica, efeito de matriz, tempo de resposta, preparo de amostra e aplicabilidade ambiental real. Ao reunir e discutir criticamente os principais avanços reportados na literatura, busca-se contribuir para uma compreensão mais realista das potencialidades e limitações dessas abordagens no contexto do monitoramento ambiental contemporâneo.

2 – METODOLOGIA

As buscas bibliográficas foram realizadas em 19 de novembro de 2025 nas bases Scopus e ScienceDirect, utilizando a seguinte *string* aplicada aos campos Título, Resumo e Palavras-chave: ("fluorescence sensor" OR "fluorescent probe" OR "fluorescent nanosensor") AND ("emerging contaminants" OR "environmental contaminants" OR "pollutants") AND ("carbon dots" OR "quantum dots" OR "molecularly imprinted polymer"). Foram considerados documentos publicados entre 2020 e 2026, classificados como artigos científicos nas áreas de Química, Engenharia Química, Ciência dos Materiais e Ciências Ambientais, incluindo trabalhos disponibilizados em formato online *first* ou *ahead of print* até a data da busca. Após a aplicação dos filtros disponíveis nas bases de dados, procedeu-se a uma triagem qualitativa por meio da leitura de títulos e resumos, com o objetivo de selecionar estudos alinhados ao escopo do trabalho. Foram incluídos artigos que abordassem a aplicação de sondas ou materiais fluorescentes na detecção de contaminantes emergentes em matrizes ambientais, sendo excluídos trabalhos de caráter exclusivamente sintético ou sem aplicação analítica, bem como duplicatas entre as bases. Os estudos selecionados compõem o corpus analisado nesta revisão. Não foi realizada meta-análise quantitativa, dada a heterogeneidade metodológica dos estudos.

3 – FUNDAMENTOS DA FLUORESCÊNCIA

A fluorescência é um processo fotofísico no qual uma molécula absorve radiação eletromagnética e, após relaxações não radiativas internas, retorna ao estado fundamental emitindo fótons de menor energia. Esse fenômeno envolve transições eletrônicas entre estados singletos, sendo tipicamente descrito pelo diagrama de Jablonski, no qual a absorção promove a excitação eletrônica e a emissão fluorescente ocorre a partir do estado excitado de menor energia (Lakowicz, 2020; Valeur; Berberan-Santos, 2013).

3.1 – Mecanismos fotofísicos e implicações analíticas

A resposta de sensores fluorescentes decorre da modulação da eficiência de emissão após a interação do fluoróforo com o analito ou com componentes da matriz (Lakowicz, 2020). Em aplicações ambientais, essa modulação pode envolver processos como supressão fluorescente, transferência eletrônica fotoinduzida, transferência de energia ou efeitos ópticos associados à absorção da radiação de excitação ou emissão por espécies presentes no meio. Em sistemas sensoriais reais, tais mecanismos frequentemente coexistem ou competem entre si, o que pode dificultar a interpretação inequívoca da resposta analítica, especialmente em matrizes ambientais complexas (Lakowicz, 2020; Irshad, et al., 2026). Independentemente do mecanismo específico, tais processos frequentemente resultam em alterações de intensidade ou de distribuição espectral da emissão, com implicações diretas para a confiabilidade analítica em matrizes complexas (Li, Yiqi et al., 2024).

Do ponto de vista analítico, esses mecanismos manifestam-se principalmente em modos de resposta do tipo *turn-off*, *turn-on* e ratiométricos (Li, Yiqi et al., 2024). Sensores *turn-off* baseiam-se na supressão da emissão fluorescente e, embora simples e amplamente explorados, são intrinsecamente mais suscetíveis a interferências de matriz, uma vez que diferentes espécies podem induzir respostas indistinguíveis da interação com o analito alvo (Irshad et al., 2026). Sensores *turn-on* apresentam aumento da emissão após a interação com o analito, frequentemente associado à supressão de processos não radiativos ou a rearranjos estruturais do fluoróforo, oferecendo melhor relação sinal-ruído, porém permanecendo dependentes de condições experimentais controladas (Li, Yiqi et al., 2024).

Sensores ratiométricos utilizam a razão entre intensidades de emissão em dois ou mais comprimentos de onda, incorporando uma referência interna que reduz a influência de

flutuações instrumentais e de efeitos ópticos da matriz (Li, Yiqi et al., 2024). Essa estratégia é frequentemente associada à maior robustez óptica, embora envolva arquiteturas mais complexas e desafios adicionais de reprodutibilidade e interpretação do sinal (Irshad et al., 2025).

3.2 – Considerações de arquitetura sensorial e efeito de matriz

Independentemente do mecanismo ou modo de resposta, o desempenho de sensores fluorescentes aplicados ao monitoramento ambiental é fortemente condicionado por fatores relacionados à arquitetura sensorial e pela composição da matriz. Sistemas de emissão única tendem a ser mais suscetíveis à autofluorescência e à sobreposição espectral, especialmente na região azul do espectro, enquanto arquiteturas de múltipla emissão ou com referência interna podem mitigar parcialmente esses efeitos à custa de maior complexidade estrutural (Li, Yiqi et al., 2024; Irshad et al., 2026).

Materiais híbridos e estruturas hospedeiras funcionais, como polímeros molecularmente impressos e estruturas metal-orgânicas, têm sido explorados para promover organização espacial do fluoróforo (Li, Yiqi et al., 2024) e, em alguns casos, pré-concentração do analito (Irshad et al., 2025). Contudo, tais estratégias não implicam necessariamente maior robustez analítica em matrizes ambientais reais, reforçando a necessidade de avaliação crítica e contextualizada dos resultados experimentais, considerando simultaneamente seletividade, cinética de resposta e viabilidade operacional (Nakaya et al., 2024).

4 – SONDAS MOLECULARES CLÁSSICAS: POTENCIAL ANALÍTICO E LIMITAÇÕES OPERACIONAIS

Sondas fluorescentes moleculares clássicas, como derivados de rodamina e fluoresceína, desempenharam papel central no desenvolvimento inicial de sensores ópticos em razão de sua elevada intensidade de emissão e ampla disponibilidade comercial (Sathiyar et al., 2026). No entanto, a literatura recente indica que a aplicação direta dessas sondas para o monitoramento ambiental de CEs apresenta restrições analíticas e operacionais relevantes, especialmente quando empregadas em matrizes ambientais complexas (Irshad et al., 2026).

De modo geral, o desempenho analítico dessas sondas baseia-se em mecanismos simples de modulação de intensidade fluorescente, predominantemente do tipo *turn-on* ou *turn-*

off (Ma et al., 2023; Liu, Shi-Tao et al., 2024). Embora eficazes em sistemas modelo, essas respostas carecem de mecanismos internos de correção do sinal e são altamente suscetíveis à autofluorescência da matriz, a variações de pH e à presença de espécies interferentes. Como consequência, observa-se comprometimento da seletividade e da robustez analítica quando essas sondas são aplicadas em ambientes reais, nos quais múltiplos fatores físico-químicos atuam simultaneamente (Ilyas et al., 2022; Fang et al., 2022).

Análises comparativas indicam que a seletividade analítica associada a essas sondas é frequentemente obtida por desenho molecular específico e validação sob condições experimentais controladas, resultando em faixas operacionais restritas e baixa tolerância a variações do meio (Yin et al., 2025). A dependência do estado de ionização, a sobreposição espectral com componentes naturais da matriz e a suscetibilidade a espécies competitivas limitam a extrapolação desses sistemas para aplicações ambientais *in situ* (Ilyas et al., 2022). Estratégias mais elaboradas, como sistemas ratiométricos ou multicomponentes, têm sido propostas para mitigar parte dessas limitações, porém à custa de maior complexidade experimental e controle rigoroso das condições do meio, reduzindo a simplicidade analítica inicialmente associada a essas sondas (Fang et al., 2022; Yin et al., 2025).

Em síntese, embora rodamina e fluoresceína apresentem desempenho fotofísico elevado em condições laboratoriais, suas limitações analíticas e operacionais restringem significativamente sua aplicabilidade como sensores independentes no monitoramento ambiental. Essa constatação sustenta a transição observada na literatura recente em direção a estratégias nas quais a fluorescência atua como elemento de transdução integrado a plataformas capazes de conferir seletividade, robustez e tolerância a efeitos de matriz compatíveis com cenários ambientais reais (Sathiyar et al., 2026; Irshad et al., 2026).

5 – MATERIAIS FLUORESCENTES AVANÇADOS

5.1 – Polímeros molecularmente impressos fluorescentes como estratégia de seletividade analítica

Polímeros molecularmente impressos (do inglês *Molecularly Imprinted Polymers* - MIPs) fluorescentes têm sido amplamente empregados como estratégia para conferir seletividade analítica a sensores ópticos voltados à detecção de contaminantes emergentes em matrizes ambientais (Liu, Yongli et al., 2023). Nesses sistemas, o MIP atua no reconhecimento

molecular, enquanto o material fluorescente ancorado em sua estrutura é responsável pela transdução óptica do evento de ligação (Majid et al., 2025).

De modo geral, sensores fluorescentes baseados em MIPs exploram arquiteturas nas quais o fluoróforo é integrado a uma matriz polimérica impressa, permitindo o reconhecimento seletivo do analito mesmo na presença de interferentes estruturalmente relacionados. As principais plataformas, classes de analitos, estratégias de seletividade e níveis de validação ambiental reportados na literatura recente encontram-se sistematizados na Tabela 1, possibilitando uma comparação direta entre diferentes abordagens e evidenciando padrões recorrentes de desempenho e limitação (Hu et al., 2021; Liu, Yongli et al., 2023; Wang et al., 2023; Zhang et al., 2025a; Zhang et al., 2025b).

Embora modificações nos núcleos emissores – como dopagem ou funcionalização superficial – sejam frequentemente empregadas com o objetivo de intensificar o sinal fluorescente ou melhorar a estabilidade fotoluminescente, estudos comparativos indicam que a seletividade analítica desses sensores permanece primariamente associada à formação, acessibilidade e integridade das cavidades impressas no polímero (Ye et al., 2025), e não às propriedades intrínsecas do material emissor (Majid et al., 2025). Essa observação reforça o papel central do *imprinting* molecular como fator determinante da discriminação analítica em sensores desse tipo.

Do ponto de vista do modo de resposta, observa-se ampla recorrência de sensores do tipo *turn-off*, nos quais a ligação do analito ao MIP promove a supressão da emissão fluorescente, geralmente associada à proximidade espacial entre o analito e o centro emissor, favorecendo processos de *quenching* ou transferência eletrônica (Liu, Yongli et al., 2023; Wang et al., 2023; Ye et al., 2025). Estratégias *turn-on* são menos frequentes, por demandarem mecanismos indiretos de modulação do sinal ou rearranjos estruturais mais complexos (Hao et al., 2025).

Apesar da elevada seletividade molecular, o desempenho analítico de sensores fluorescentes baseados em MIPs é fortemente condicionado às condições experimentais. Dependência de pH, tempos de incubação relativamente longos associados à difusão do analito através da matriz polimérica e necessidade de preparo prévio de amostra são limitações recorrentes em aplicações envolvendo matrizes ambientais reais (Hu et al., 2021; Majid et al., 2025; Yang et al., 2025; Serag et al., 2025). Além disso, ciclos sucessivos de uso e regeneração podem comprometer a integridade das cavidades impressas, resultando em perda progressiva de eficiência de reconhecimento molecular (Hu et al., 2021; Serag et al., 2025).

Tabela 1: Sensores fluorescentes baseados em polímeros molecularmente impressos (MIPs) aplicados à detecção de contaminantes ambientais (2020–2026)

Ref.	Classe de analito (exemplos)	Plataforma fluorescente arquitetura	Modo de resposta / LOD (ordem)	Validação e limitações principais
Liu, Yongli et al., 2023	Disruptores endócrinos (bisfenol A)	CDs@MIP (núcleo–casca)	<i>Turn-off</i> / nM	Água superficial real e plástico; dependência de pH neutro, extração orgânica
Hu et al., 2021; Ye et al., 2025; Serag et al., 2025	Antibióticos (tetraciclina, amoxicilina, meropenem)	CDs@MIP (núcleo–casca)	<i>Turn-off</i> / ng–µg L ⁻¹	Água de rio, matrizes alimentares, torneira e efluente; incubação longa, preparo de amostra, pH/temperatura
Majid et al., 2025	Fármacos (metronidazol)	APTES-CQDs@MIP	<i>Turn-off</i> / µM	Água de rio, torneira, efluente e mar; faixa restrita de pH, filtração prévia
Wang et al., 2023	Fenóis (4-nitrofenol)	CQDs@MIP	<i>Turn-off</i> / µM	Água superficial, industrial e marinha; extração e pré-concentração
Hao et al., 2025	Pesticidas (acetamiprida)	SiO ₂ @FITC@MIP	<i>Turn-on</i> / µg L ⁻¹	Água do mar; controle rigoroso de pH, baixa discriminação de análogos
Yang et al., 2025	Micotoxinas (zearalenona)	MIP magnético (Fe ₃ O ₄ @SiO ₂)	<i>Turn-off</i> / ng mL ⁻¹	Matrizes alimentares; preparo complexo, sem validação aquosa
Zhang et al., 2025a; Zhang et al., 2025b	Antibióticos (sulfonamidas)	Array de CDs@MIPs	<i>Turn-off</i> / µg mL ⁻¹	Água de lago e sedimento; ML, pré-tratamento, controle de pH
Liu, Xiqing et al., 2020	Antibióticos (tetraciclina)	ZnO NRs@MIP	<i>Turn-off</i> / µM	Água de rio; filtração obrigatória, pH controlado
Wei et al., 2026	Pesticidas (tiametoxam)	Tb/Ce-MOF@MIP	<i>Turn-off</i> / µM	Solo, maçã e chá; incubação longa, preparo de sólidos, pH

Fonte: O autor (2025)

Em síntese, MIPs fluorescentes constituem uma estratégia eficaz para a obtenção de seletividade analítica em sensores ambientais, desde que os ganhos em reconhecimento molecular sejam avaliados à luz da cinética de resposta, da robustez operacional e do nível de validação ambiental efetivamente alcançado. Esses aspectos devem ser considerados criticamente na comparação com outras abordagens sensoriais e no desenvolvimento de arquiteturas mais avançadas, particularmente aquelas que integram seletividade molecular a

estratégias de robustez óptica e multifuncionalidade, discutidas nas seções subsequentes (Liu, Yongli et al., 2023; Majid et al., 2025; Serag et al., 2025; Zhang et al., 2025b).

5.2 – Sensores fluorescentes ratiométricos aplicados ao monitoramento ambiental

Sensores fluorescentes ratiométricos têm sido amplamente explorados no monitoramento ambiental como estratégia para aumentar a robustez analítica frente a flutuações instrumentais, variações na concentração do sensor e interferências ópticas associadas à matriz (Li, Yiqi et al., 2024). Ao empregar a razão entre duas ou mais bandas de emissão, esses sistemas incorporam um mecanismo de autocalibração que reduz a dependência de condições experimentais externas, distinguindo-se de sensores baseados exclusivamente em variações absolutas de intensidade fluorescente (Irshad et al., 2025).

Em aplicações ambientais, a ratiometria tem sido implementada por meio de diferentes arquiteturas funcionais, incluindo sistemas de dupla emissão, combinações entre emissores responsivos e referências ópticas relativamente inertes, bem como estratégias baseadas em transferência de energia ou modulação diferencial de supressão fluorescente (Li, Yiqi et al., 2024). Independentemente da arquitetura específica, o princípio analítico central reside na utilização de um canal óptico interno de referência, capaz de mitigar parcialmente efeitos de absorção, espalhamento e autofluorescência da matriz, particularmente relevantes em matrizes aquosas complexas (Irshad et al., 2026).

Do ponto de vista analítico, sensores ratiométricos tendem a apresentar melhor reprodutibilidade e menor sensibilidade a flutuações experimentais quando comparados a sistemas de emissão única (Guo et al., 2024). No entanto, essa robustez óptica adicional não elimina limitações associadas à seletividade química e à interação com componentes da matriz ambiental. Em diversos estudos, a resposta ratiométrica permanece condicionada a parâmetros como pH, força iônica e composição da matriz, além de depender de controle rigoroso das proporções entre emissores e da estabilidade relativa de cada canal de emissão (Zhao et al., 2025; Xiang et al., 2025).

A incorporação da ratiometria a estratégias de reconhecimento químico específico, como polímeros molecularmente impressos, tem sido proposta como forma de ampliar simultaneamente seletividade e confiabilidade do sinal (Guo et al., 2024). Ainda assim, essa integração resulta, em geral, em arquiteturas estruturalmente mais complexas, com maior número de etapas sintéticas, desafios de reprodutibilidade interlotes e potenciais limitações de

miniaturização e portabilidade. Esses compromissos operacionais são recorrentes em sensores ratiométricos ambientalmente aplicados e devem ser avaliados criticamente em função do cenário analítico pretendido (Zhao et al., 2025; Tang et al., 2025).

Outro aspecto recorrente é o nível de validação ambiental desses sensores. Embora a ratiometria contribua para reduzir flutuações ópticas, a maioria dos estudos permanece restrita a ensaios em amostras fortificadas ou matrizes parcialmente controladas, frequentemente exigindo preparo prévio de amostra ou ajuste de condições físico-químicas (Xiang et al., 2025; Pu et al., 2024). Assim, a ratiometria deve ser compreendida como uma estratégia eficaz para aprimorar a confiabilidade do sinal fluorescente, mas não como solução isolada para os desafios impostos por matrizes ambientais heterogêneas (Li, Ruonan et al., 2025).

As principais arquiteturas ratiométricas, estratégias dominantes de seletividade e níveis de validação ambiental reportados na literatura recente encontram-se sintetizados na Tabela 2, evidenciando a recorrência de compromissos entre robustez óptica, seletividade química e viabilidade operacional em aplicações ambientais.

Tabela 2: Sensores fluorescentes ratiométricos aplicados ao monitoramento ambiental.

Ref	Classe de analito (exemplos)	Plataforma ratiométrica	Estratégia dominante	LOD (ordem)	Validação e limitações principais
Guo et al., 2024	Plastificantes (dibutil ftalato)	MIP bio-based + CDs	<i>Imprinting</i> molecular + ratiometria	$\mu\text{g L}^{-1}$	Água potável; preparo de amostra, controle de pH
Zhao et al., 2025	Antibióticos (ciprofloxacina)	CdTe QDs@SiO ₂ @MIP + Tb ³⁺	<i>Imprinting</i> molecular + multiemissão	μM	Água do mar e de rio; dopagem e pH críticos
Tang et al., 2025; Hu et al., 2024; Pu et al., 2024	Antibióticos (fluoroquinolonas, tetraciclina)	CDs/QDs + Ln ³⁺ ou corante orgânico	Interações químicas gerais + efeito antena	nM	Água, leite, ovos; seletividade limitada, estabilidade térmica
Xiang et al., 2025	Herbicidas (glifosato)	bCDs + CdSe/ZnS QDs	Interações ácido-base / ICT	μM	Produtos agrícolas; incubação e ajuste de pH
Li et al., 2025	Organofosforados (metil paration)	SiQDs + sistema enzimático	Inibição enzimática acoplada	nM	Água e batata; múltiplas etapas, dependência enzimática

Fonte: O autor (2025)

5.3 – Sensores fluorescentes simples e estratégias de baixo custo

A utilização de sensores fluorescentes simples, baseados predominantemente em *carbon dots* (CDs) e *graphene quantum dots* (GQDs), tem sido amplamente associada a propostas de

baixo custo, simplicidade de síntese e alinhamento a princípios de sustentabilidade. Especialmente pela utilização de precursores acessíveis ou residuais e rotas de síntese de etapa única (Nsibande; Forbes, 2020), incluindo abordagens baseadas em resíduos plásticos, biomassa e subprodutos ambientais (Enyoh et al., 2025). No contexto ambiental, contudo, essa classe de sensores apresenta limitações recorrentes, particularmente no que se refere à seletividade analítica, à robustez frente a interferências de matriz e ao nível de validação em condições reais.

Do ponto de vista funcional, sensores fluorescentes simples são majoritariamente concebidos como sistemas de emissão única, com respostas baseadas em variações de intensidade fluorescente, predominantemente do tipo *turn-off* (Lai et al., 2020; Thulasi et al., 2020). Mecanismos como *quenching* fluorescente, efeito de filtro interno e transferência eletrônica fotoinduzida são os mais frequentemente explorados (Lai et al., 2020; Abdella et al., 2025), refletindo um compromisso de projeto entre simplicidade construtiva e confiabilidade analítica. Embora abordagens mais elaboradas, como sistemas *on-off-on* ou arquiteturas fluorescentes de múltipla emissão, tenham sido reportadas (Yu et al., 2024; Bai et al., 2025), essas permanecem exceções e geralmente implicam maior complexidade experimental, reduzindo parcialmente a vantagem associada ao baixo custo (Yu et al., 2024; Lu et al., 2025; Bai et al., 2025).

O desempenho analítico reportado para essa classe de sensores apresenta ampla variabilidade, com limites de detecção que se estendem das faixas micromolar a nanomolar, fortemente dependentes do mecanismo fotofísico explorado e da sobreposição espectral entre analito e material emissor (Nsibande; Forbes, 2020; Lai et al., 2020; Thulasi et al., 2020; Bai et al., 2025). Sensibilidades elevadas podem ser alcançadas mesmo em sistemas obtidos por rotas sintéticas sustentáveis, mas tendem a ocorrer sob condições experimentais controladas ou em matrizes de baixa complexidade, o que limita sua extrapolação para cenários ambientais heterogêneos (Lu et al., 2025).

A validação ambiental desses sensores permanece, em grande parte, restrita a ensaios em amostras aquosas fortificadas, com aplicações em águas naturais frequentemente condicionadas a etapas prévias de filtração, ajuste de pH ou controle rigoroso de interferentes (Koparde et al., 2024; Yu et al., 2024). Além disso, fatores como autofluorescência da matriz – especialmente para emissores na região do azul do espectro –, seletividade limitada frente a espécies estruturalmente semelhantes, dependência crítica de parâmetros físico-químicos e

variabilidade interlotes comprometem a robustez e a reprodutibilidade desses sensores em aplicações ambientais reais (Thulasi et al., 2020; Enyoh et al., 2025; Ren et al., 2025).

As principais classes de sensores fluorescentes simples analisadas neste trabalho, bem como seus modos de resposta, ordens de limite de detecção e níveis de validação ambiental, encontram-se sistematizadas na Tabela 3, permitindo uma visão comparativa das vantagens e limitações associadas a essa abordagem.

Tabela 3: Sensores fluorescentes simples e de baixo custo aplicados ao monitoramento ambiental

Ref	Classe de analito (exemplos)	Material fluorescente / origem	Estratégia / modo de resposta	LOD (ordem)	Validação ambiental e limitações principais
Nsibande & Forbes 2020	PAHs (pireno)	GQDs (ácido cítrico, GO)	<i>Turn-on</i> mediado por Fe^{3+}	μM	Água de lago; LOD elevado, faixa linear estreita, supressão prévia
Lai et al. 2020; Koparde et al. 2024	Nitroaromáticos / íons metálicos	N,S-CNPs; N-CDs (ácido cítrico, biomassa)	<i>Turn-off</i> (IFE + <i>quenching</i>)	$\text{nM}-\mu\text{g mL}^{-1}$	Água de rio, lago e torneira; seletividade limitada, dependência de pH
Thulasi et al. 2020	Corantes / íons metálicos	CDs (fuligem veicular)	<i>Turn-off</i> (IFE / <i>quenching</i>)	nM	Bebidas comerciais; baixa seletividade, purificação extensa
Enyoh et al. 2025; Yu et al. 2024; Bai et al. 2025	Íons metálicos / fármacos	PET-CQDs; NS-CQDs; P-CNQDs (resíduos, biomassa)	Multiemissão / <i>on-off-on</i>	$\text{ng}-\mu\text{g L}^{-1}$	Água real; efeito de matriz, ajustes de pH, operação sequencial
Lu et al. 2025	Fármacos (naproxeno, enantiômeros)	β -CD-CQDs	<i>Turn-on</i> (PET competitivo)	μM	Diversas águas reais; dependência de pH e temperatura, emissão azul
Abdella et al. 2025; Ren et al. 2025	Íons metálicos / pesticidas	CdTe-QDs; GQDs funcionalizados	<i>Turn-off</i> (<i>quenching</i>)	nM	Água de torneira / soluções modelo; toxicidade do Cd, sem validação real

Fonte: O autor (2025)

Por fim, emerge um paradoxo recorrente entre sustentabilidade declarada e impacto ambiental efetivo. Embora sensores baseados em CDs sejam frequentemente apresentados como alternativas ambientalmente corretas (Enyoh et al., 2025), plataformas sensoriais que empregam pontos quânticos contendo metais tóxicos, como cádmio, permanecem limitadas pela toxicidade intrínseca do material, mesmo quando obtidas por rotas classificadas como sustentáveis (Abdella et al., 2025). Nesse contexto, a consolidação de sensores fluorescentes

simples como ferramentas efetivamente viáveis para o monitoramento ambiental depende menos da origem dos precursores e mais da superação de limitações analíticas recorrentes relacionadas à seletividade, à robustez analítica e à validação em matrizes ambientais reais.

5.4 – Nanopartículas Funcionalizadas e Materiais Híbridos Fluorescentes

Materiais híbridos fluorescentes têm sido propostos como estratégia para mitigar limitações inerentes a sensores monocomponentes, particularmente no que se refere à seletividade analítica, à estabilidade do sinal e ao desempenho em matrizes ambientais complexas (Renu et al., 2025; Li, Yiqi et al., 2024). Essas plataformas combinam nanomateriais emissores, como *carbon dots* e *quantum dots*, (QDs), com matrizes funcionais adicionais – incluindo estruturas metal-orgânicas, polímeros molecularmente impressos e componentes magnéticos – resultando em arquiteturas multifuncionais nas quais diferentes funções analíticas são integradas em um único sistema (Wang et al., 2020). As principais arquiteturas híbridas analisadas neste trabalho encontram-se sintetizadas na Tabela 4.

Tabela 4: Sensores fluorescentes híbridos avançados aplicados ao monitoramento ambiental

Ref	Arquitetura híbrida (classe)	Classe de analito (exemplos)	Estratégia funcional dominante	Resposta / LOD (ordem)	Validação ambiental e limitações
Tang et al., 2025	GCDs@Eu-MOF (CDs + MOF Ln ³⁺)	Fluoroquinolonas (classe completa)	Ratiometria por efeito antena + transferência de energia	Ratiométrico / nM	Água de lago, leite, ovos; preparo de amostra, MOF com Eu
Wang et al., 2020	MOF–CDs@MIP	Antibióticos (quinolonas)	Reconhecimento molecular + amplificação fotofísica	Turn-off / nM	Água fortificada; síntese complexa, regeneração limitada
Qin et al., 2025	CDs dopados (nanozima híbrida)	Fenóis, pesticidas	Catálise mimética + fluorescência indireta	Turn-off / μM–nM	Água real; interferência oxidantes, controle de pH
Renu et al., 2025; Liu, Piatong et al., 2025	Ln-MOF híbridos (multiemissão)	Íons metálicos, antibióticos	Dupla emissão ratiométrica	Ratiométrico / nM	Água fortificada; estabilidade, custo
Bhatt & Mehata, 2025	Híbridos magnéticos fluorescentes	Nitroaromáticos	Pré-concentração + supressão fluorescente	Turn-off / μM	Água e solo; preparo de amostra
Darabdhara & Ahmaruzzaman, 2026	CDs/MOF sustentáveis	Corantes, fenóis	Adsorção + modulação fluorescente	Turn-off / μM	Água real; seletividade limitada

Fonte: O autor (2025)

Entre os padrões estruturais mais frequentes, observa-se o uso de *carbon dots* como unidades emissoras primárias, frequentemente ancoradas ou encapsuladas em matrizes sólidas, com o objetivo de promover estabilização fotofísica e organização espacial do fluoróforo. Em sistemas baseados em estruturas metal-orgânicas contendo terras-raras, efeitos de antena e transferência de energia permitem arquiteturas de dupla emissão, favorecendo respostas ratiométricas mais robustas do ponto de vista óptico e fotofísico (Lu et al., 2024; Renu et al., 2025; Liu, Piatong et al., 2025). Ainda assim, conforme evidenciado na Tabela 4, a simples integração de múltiplos componentes não implica, necessariamente, maior robustez analítica em matrizes ambientais reais.

A incorporação de polímeros molecularmente impressos em arquiteturas híbridas representa uma vertente particularmente relevante ao introduzir seletividade molecular específica em plataformas multifuncionais (Wang et al., 2020). Compósitos baseados em MIP permitem ganhos significativos de discriminação frente a interferentes estruturais, atribuídos à sinergia entre reconhecimento molecular e amplificação fotofísica. Em contrapartida, sensores híbridos sem *imprinting* dependem fortemente do controle da química de superfície para alcançar seletividade aceitável, mesmo quando apresentam limites de detecção comparáveis (Bhatt; Mehata, 2025).

Além das abordagens baseadas em reconhecimento clássico, emergem materiais híbridos com funcionalidade tipo nanozima, nos quais o material participa ativamente da transdução e da amplificação do sinal analítico (Qin et al., 2025). Nessas plataformas, a fluorescência é frequentemente utilizada de forma indireta, acoplada a reações catalíticas miméticas, ampliando o escopo analítico para além da detecção direta baseada em intensidade de emissão.

Apesar dos avanços conceituais, a aplicação ambiental de sensores híbridos permanece condicionada a limitações operacionais recorrentes. Dependência crítica do pH, necessidade de preparo prévio de amostras – especialmente em matrizes sólidas ou efluentes complexos – complexidade sintética e uso predominante de instrumentação espectrofluorimétrica de bancada continuam sendo desafios amplamente reportados (Wang et al., 2020; Bhatt; Mehata, 2025). Adicionalmente, a escassez de estudos sistemáticos de estabilidade de longo prazo, reprodutibilidade interlotes e validação em condições de campo limita a consolidação dessas plataformas para monitoramento ambiental contínuo (Darabdhara; Ahmaruzzaman, 2025).

De forma geral, materiais híbridos fluorescentes representam uma evolução conceitual relevante na engenharia de sensores ambientais ao integrar múltiplas funcionalidades em uma

única arquitetura. Contudo, os ganhos em seletividade e robustez óptica devem ser avaliados à luz da complexidade estrutural, da viabilidade operacional e do nível de validação ambiental efetivamente alcançado, evitando extrapolações baseadas exclusivamente em métricas analíticas isoladas (Renu et al., 2025; Li, Yiqi et al., 2024; Liu, Piatong et al., 2025).

6 – COMPARAÇÃO COM MÉTODOS CONVENCIONAIS

A comparação entre sensores fluorescentes e métodos convencionais de monitoramento ou tratamento ambiental deve ser conduzida a partir de suas finalidades funcionais distintas, evitando leituras competitivas simplificadoras. Enquanto sensores fluorescentes têm como objetivo primário a detecção, quantificação e triagem de contaminantes em níveis traço, métodos convencionais abrangem tanto abordagens analíticas consolidadas, como a cromatografia acoplada à espectrometria de massas, quanto tecnologias voltadas à remoção ou degradação de poluentes, a exemplo dos processos oxidativos avançados (Lopardo et al., 2018; Miklos et al., 2018). Trata-se, portanto, de estratégias que ocupam etapas complementares da gestão ambiental, ainda que frequentemente sejam discutidas de forma comparativa na literatura. Essas diferenças conceituais de finalidade e função são sintetizadas de forma comparativa na Tabela 5.

Do ponto de vista operacional, sensores fluorescentes baseados em *carbon dots*, pontos quânticos e materiais híbridos, discutidos ao longo do Capítulo 5, caracterizam-se por tempos de resposta curtos, tipicamente da ordem de minutos, além de demandarem volumes reduzidos de amostra e instrumentação relativamente simples. Em contraste, métodos convencionais, tanto analíticos quanto voltados ao tratamento ambiental, tendem a exigir maior tempo de operação, preparo extensivo de amostras e controle rigoroso de variáveis experimentais. Essas diferenças evidenciam a adequação dos sensores fluorescentes para aplicações de monitoramento quase em tempo real e triagem distribuída, ainda que não substituam métodos confirmatórios ou tecnologias de intervenção ambiental.

A robustez frente à complexidade das matrizes ambientais constitui outro eixo comparativo relevante. Sensores fluorescentes apresentam, de modo geral, sensibilidade a parâmetros como pH, força iônica e presença de interferentes, limitações amplamente discutidas ao longo deste trabalho. Por sua vez, métodos convencionais também enfrentam restrições importantes em matrizes reais. Abordagens cromatográficas, por exemplo, são reconhecidas por sua elevada seletividade e sensibilidade, mas frequentemente apresentam

efeitos de matriz significativos em amostras ambientais complexas, exigindo calibrações específicas e estratégias de correção para assegurar confiabilidade analítica (Lopardo et al., 2018; Ramadan et al., 2024). A tolerância à interferência de matriz permanece, assim, um desafio transversal, independentemente da abordagem empregada.

Tabela 5: Comparação entre sensores fluorescentes e métodos convencionais aplicados à análise ambiental

Critério	Sensores fluorescentes	Métodos convencionais
Finalidade principal	Deteção, quantificação e triagem de contaminantes em níveis traço	Monitoramento confirmatório e/ou remediação de contaminantes
Tipo de resposta analítica	Óptica, baseada em fluorescência (intensidade, razão ou mudança espectral)	Cromatográfica, espectrofotométrica ou reacional
Tempo típico de análise	Curto, geralmente da ordem de minutos	Prolongado, variando de dezenas de minutos a horas
Preparo de amostra	Mínimo ou inexistente, dependendo da matriz	Extenso, envolvendo extração, pré-concentração ou derivatização
Sensibilidade	Elevada, frequentemente nas faixas nanomolar a picomolar	Muito elevada, especialmente em métodos LC-MS/MS
Seletividade	Dependente do material sensor e do mecanismo de reconhecimento	Elevada, baseada em separação instrumental ou reações específicas
Robustez em matrizes reais	Variável, condicionada à composição da matriz	Alta, condicionada a estratégias de correção de efeito de matriz
Instrumentação necessária	Simples a moderada, com potencial para portabilidade	Complexa, dependente de infraestrutura laboratorial
Custo operacional	Baixo a moderado	Elevado, envolvendo equipamentos e consumíveis especializados
Potencial de aplicação <i>in situ</i>	Alto, especialmente em integração com plataformas portáteis de leitura	Baixo, majoritariamente restrito a ambiente laboratorial
Escalabilidade	Alta para monitoramento e triagem distribuída	Alta para tratamento; limitada para monitoramento contínuo
Papel na gestão ambiental	Alerta precoce, monitoramento contínuo e suporte à tomada de decisão	Confirmação analítica, quantificação de referência e remediação

Fonte: O autor (2025)

No que se refere à complexidade instrumental e ao custo operacional, sensores fluorescentes apresentam vantagens relativas quando empregados como ferramentas de triagem e monitoramento distribuído. A possibilidade de integração com plataformas portáteis de leitura contrasta com a dependência de infraestrutura laboratorial avançada em métodos cromatográficos, que envolvem alto custo de aquisição, manutenção e necessidade de pessoal especializado (Koziarska et al., 2025; Bona et al., 2025). Mesmo métodos analíticos clássicos, como a espectrofotometria UV-Vis, embora simples e de baixo custo, apresentam limitações de seletividade e maior suscetibilidade a interferências de matriz quando comparados a abordagens fluorescentes (Cheng et al., 2021).

A validação ambiental representa um ponto crítico comum a todas as estratégias. Sensores fluorescentes são frequentemente avaliados por meio de ensaios de recuperação em amostras fortificadas, enquanto métodos cromatográficos e processos oxidativos avançados tendem a incluir aplicações em matrizes ambientais reais, ainda que com aumento significativo da complexidade experimental e, em alguns casos, redução do desempenho analítico ou de tratamento (Lopardo et al., 2018; Oluwole; Olatunji, 2023). Revisões críticas ressaltam que a transposição de resultados laboratoriais para cenários ambientais heterogêneos permanece um desafio central, sobretudo devido à variabilidade de matriz, ao consumo energético e à formação de subprodutos (Miklos et al., 2018).

Por fim, a análise comparativa indica que sensores fluorescentes e métodos convencionais devem ser compreendidos como abordagens complementares, e não excludentes. Sensores fluorescentes oferecem vantagens claras para alerta precoce, monitoramento contínuo e suporte à tomada de decisão, enquanto métodos convencionais permanecem essenciais para a confirmação analítica e a remediação efetiva de contaminantes. A articulação entre detecção rápida e intervenção corretiva constitui, assim, um caminho promissor para a gestão ambiental baseada em dados, conectando monitoramento analítico e ação mitigadora de forma mais eficiente.

7 – DESAFIOS, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS

Os desafios, limitações e perspectivas discutidos a seguir refletem tendências recorrentes observadas na literatura analisada ao longo deste trabalho. Apesar dos avanços expressivos no desenvolvimento de sensores fluorescentes aplicados à análise ambiental, a consolidação dessas plataformas em cenários reais de monitoramento permanece condicionada a desafios analíticos recorrentes. Entre eles, a interferência de matriz destaca-se como limitação transversal, comum a praticamente todas as arquiteturas sensoriais discutidas neste trabalho. Matrizes ambientais complexas, como águas residuárias, efluentes industriais e águas naturais ricas em matéria orgânica, impõem interferências ópticas e químicas que afetam tanto a intensidade quanto a seletividade da resposta fluorescente, frequentemente exigindo etapas adicionais de preparo de amostra. Mesmo estratégias reconhecidamente eficazes, como o uso de polímeros molecularmente impressos ou arquiteturas ratiométricas, mitigam esses efeitos apenas de forma parcial, reforçando o caráter inerente – e não pontual – desse desafio.

Nesse contexto, emerge de forma consistente um conjunto de *trade-offs* inevitáveis entre seletividade analítica, tempo de resposta e robustez operacional. Estratégias baseadas em reconhecimento molecular específico, como MIPs fluorescentes, oferecem ganhos claros de seletividade, mas frequentemente apresentam cinética mais lenta e maior sensibilidade a parâmetros experimentais. Por outro lado, arquiteturas híbridas multifuncionais, ao integrarem diferentes estratégias em uma única plataforma, tendem a introduzir maior complexidade sintética e operacional, exigindo controle rigoroso de parâmetros estruturais para assegurar desempenho reprodutível. Esses compromissos evidenciam que ganhos analíticos raramente são alcançados sem custos associados à aplicabilidade prática.

Do ponto de vista fotofísico, a predominância de respostas do tipo *turn-off* constitui uma limitação recorrente em sensores fluorescentes ambientais. Embora compatíveis com rotas sintéticas simples e frequentemente associadas a baixos custos, arquiteturas baseadas em supressão de fluorescência são intrinsecamente mais suscetíveis a interferências de matriz e flutuações instrumentais, o que compromete a confiabilidade analítica em aplicações *in situ*. A ratiometria, por sua vez, representa uma estratégia eficaz para aumentar a robustez óptica do sinal, mas não se configura como solução universal. O desempenho de sensores ratiométricos permanece fortemente condicionado à integração entre mecanismo fotofísico e reconhecimento químico, além de frequentemente implicar maior complexidade estrutural e dependência de materiais críticos.

A sustentabilidade, frequentemente destacada como vantagem de sensores baseados em *carbon dots*, também deve ser analisada de forma crítica. Embora o uso de precursores de baixo custo ou de origem residual contribua para alinhar essas plataformas a princípios de química verde, observa-se um descompasso recorrente entre o discurso de sustentabilidade e o impacto analítico efetivo. Etapas extensas de purificação, emissão predominantemente na região azul do espectro e elevada suscetibilidade à autofluorescência da matriz reduzem a atratividade desses sensores em aplicações ambientais complexas. Assim, a sustentabilidade efetiva dessas plataformas depende não apenas da origem dos materiais, mas da robustez analítica, da reprodutibilidade e da redução de etapas auxiliares que aumentam o custo energético e operacional.

Outro aspecto crítico refere-se à validação ambiental. A predominância de ensaios em amostras fortificadas, a escassez de estudos de longo prazo e a limitada avaliação de reprodutibilidade interlotes dificultam a extrapolação de resultados laboratoriais para cenários ambientais reais e dinâmicos. Adicionalmente, a baixa frequência de estudos comparativos

conduzidos sob condições experimentais equivalentes compromete a avaliação objetiva de ganhos analíticos entre diferentes arquiteturas sensoriais, reforçando a necessidade de protocolos mais harmonizados e realistas.

As perspectivas apontam para o desenvolvimento de plataformas mais equilibradas, nas quais seletividade molecular, robustez óptica e viabilidade operacional sejam consideradas de forma integrada. Abordagens que combinam reconhecimento químico específico com estratégias ratiométricas ou arquiteturas híbridas multifuncionais emergem como caminhos promissores, desde que acompanhadas por validação ambiental mais rigorosa. De forma complementar, *arrays* de sensores e análise multivariada oferecem potencial para superar limitações associadas à seletividade estrita de sensores individuais, enquanto a integração com plataformas portáteis de monitoramento, como dispositivos baseados em *smartphone*, pode ampliar o acesso a ferramentas de monitoramento ambiental rápido e descentralizado. Em consonância com a comparação apresentada no Capítulo 6, a consolidação dos sensores fluorescentes dependerá de sua integração racional com métodos confirmatórios estabelecidos, atuando como ferramentas complementares em sistemas de monitoramento ambiental orientados por dados.

8 – CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise crítica do estado da arte de sensores fluorescentes aplicados ao monitoramento ambiental de contaminantes emergentes, estruturada a partir de eixos conceituais e funcionais, em vez de uma organização baseada exclusivamente em classes de materiais. A revisão da literatura evidenciou o papel relevante dessas plataformas como ferramentas de detecção rápida, triagem e monitoramento quase em tempo real, especialmente em contextos que demandam baixo custo operacional, simplicidade instrumental e potencial de aplicação *in situ*.

A análise da literatura indica que, embora sensores fluorescentes apresentem elevada sensibilidade e versatilidade, sua aplicação em matrizes ambientais reais permanece condicionada a desafios recorrentes, como interferência de matriz, dependência de parâmetros físico-químicos e limitações de validação ambiental. Abordagens mais elaboradas, como sistemas ratiométricos e materiais híbridos multifuncionais, demonstram avanços importantes em termos de robustez óptica e seletividade analítica, porém frequentemente implicam maior complexidade experimental e operacional, o que exige avaliação quanto à viabilidade prática.

A comparação com métodos convencionais reforça que sensores fluorescentes não devem ser compreendidos como substitutos de técnicas confirmatórias ou de tecnologias de remediação, mas como abordagens complementares dentro da gestão ambiental. Nesse contexto, seu principal valor reside na capacidade de fornecer informações rápidas e contínuas que subsidiam a tomada de decisão e orientam ações corretivas mais robustas.

Por fim, a consolidação de sensores fluorescentes como ferramentas efetivamente aplicáveis ao monitoramento ambiental depende menos do avanço isolado de materiais emissores e mais da integração equilibrada entre seletividade analítica, robustez do sinal, validação em matrizes reais e viabilidade operacional. Essa perspectiva reforça a importância de abordagens sistêmicas e criteriosas no desenvolvimento e na avaliação dessas plataformas, alinhando inovação analítica às demandas reais do monitoramento ambiental. Nesse sentido, sensores fluorescentes consolidam-se como ferramentas estratégicas de suporte à gestão ambiental, e não como soluções isoladas.

REFERÊNCIAS

ABDELLA, Faiza I. A. *et al.* CdTe-MSA quantum dots prepared by a green hydrothermal route as highly selective ‘turn-off’ fluorescent nanosensors for lead(ii) detection in environmental water monitoring. **Chemical Physics Impact**, p. 100952, out. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chphi.2025.100952>. Acesso em: 5 jan. 2026.

BAI, Ruining *et al.* Unlocking multi-mode sensing potential: Phosphorus-doped graphitic carbon nitride quantum dots for Ag⁺, ciprofloxacin, and riboflavin analysis in environment and food matrices. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 325, p. 125041, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125041>. Acesso em: 5 jan. 2026.

BHATT, Neha; MEHATA, Mohan Singh. WSe₂ quantum dots: a fluorescent probe for ultra-sensitive detection of explosive 2,4,6-trinitrophenol. **Materials Research Bulletin**, p. 113633, jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2025.113633>. Acesso em: 5 jan. 2026.

BONA, Daniel *et al.* Development of an efficient HPLC-MS/MS method for the detection of a broad spectrum of hydrophilic and lipophilic contaminants in marine waters: an experimental design approach. **Separations**, v. 12, n. 10, p. 257, 23 set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/separations12100257>. Acesso em: 29 dez. 2025.

CHENG, Fei *et al.* A simple, sensitive and selective spectrophotometric method for determining iron in water samples. **Microchemical Journal**, v. 165, p. 106154, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106154>. Acesso em: 29 dez. 2025.

DARABDHARA, Jnyanashree; AHMARUZZAMAN, Md. Zn-Based metal organic framework encapsulated bio-inspired derived carbon-quantum dots composite as multifunctional material for photocatalytic removal of victoria blue and rose bengal and fluorescent probe for efficient fe³⁺ ion detection. **Materials Research Bulletin**, p. 113937, dez. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2025.113937>. Acesso em: 5 jan. 2026.

ENYOH, Christian Ebere *et al.* Green one-step synthesis and characterization of fluorescent carbon quantum dots from PET waste as a dual-mode sensing probe for pd(ii), ciprofloxacin, and fluoxetine via fluorescence quenching and enhancement mechanisms. **Surfaces**, v. 8, n. 2, p. 24, 3 abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/surfaces8020024>. Acesso em: 5 jan. 2026.

FANG, Fang *et al.* An efficiently ratiometric fluorescent probe based on bis-dihydroxyboron fluorescein complexes for detection of pyrethroid residues in fruit juices. **Microchemical Journal**, v. 172, p. 106954, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106954>. Acesso em: 5 jan. 2026.

GUO, Xu *et al.* Highly sensitive ratiometric fluorescence detection of dibutyl phthalate in liquor and water using bio-based fluorescent molecularly imprinted polymers. **Talanta**, p. 127329, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2024.127329>. Acesso em: 5 jan. 2026.

HAO, Xiaochen; HE, Cheng; LIAN, Ziru. Fluorescence turn-on recognition of trace acetamiprid in seawater using selective molecularly imprinted polymer-based nanoprobe. **Marine Pollution Bulletin**, v. 210, p. 117320, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117320>. Acesso em: 5 jan. 2026.

HINOJOSA, Mercedes *et al.* Solar photo-Fenton optimization at neutral pH for microcontaminant removal at pilot plant scale. **Environmental Science and Pollution Research**, 11 ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28988-7>. Acesso em: 29 dez. 2025.

HU, Xuelian *et al.* A strong blue fluorescent nanoprobe based on Mg/N co-doped carbon dots coupled with molecularly imprinted polymer for ultrasensitive and highly selective detection of tetracycline in animal-derived foods. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 338, p. 129809, jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129809>. Acesso em: 5 jan. 2026.

ILYAS, Qanita *et al.* Fluorescein based fluorescent and colorimetric sensors for sensitive detection of TNP explosive in aqueous medium: application of logic gate. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 272, p. 120994, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.120994>. Acesso em: 5 jan. 2026.

IRSHAD, Hasher; KHADIJA, Katrine Qvortrup. Fluorescent sensors for trace detection of hydrocarbons, explosives, and drug residues in soil: advances and critical insights. **Trends in Environmental Analytical Chemistry**, p. e00294, mar. 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.teac.2025.e00294>. Acesso em: 5 jan. 2026.

IRSHAD, Hasher; KHADIJA, Katrine Qvortrup. Advances in fluorescent sensors for trace detection of metal contaminants and agrochemical residues in soil: A comprehensive review part I. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, p. 118365, jul. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118365>. Acesso em: 5 jan. 2026.

KASWAN, Vipin; KAUR, Harpreet. A comparative study of advanced oxidation processes for wastewater treatment. **Water Practice & Technology**, 18 abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.061>. Acesso em: 29 dez. 2025.

KHAN, Shamshad *et al.* Emerging contaminants of high concern for the environment: current trends and future research. **Environmental Research**, v. 207, p. 112609, maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112609>. Acesso em: 5 jan. 2026.

KOZIARSKA, Marta; STRZEBONSKA, Magdalena; SZALIŃSKA, Ewa. Development and validation of a green/blue UHPLC-MS/MS method for trace pharmaceutical monitoring. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, 22 ago. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15614-4>. Acesso em: 29 dez. 2025.

KOPARDE, Sneha V. *et al.* Okra peel-derived nitrogen-doped carbon dots: eco-friendly synthesis and multi-functional applications in heavy metal ion sensing, nitro compound detection and environmental remediation. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, p. 124659, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124659>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LAI, Wenqiang *et al.* Selective determination of 2,4,6-trinitrophenol by using a novel carbon nanoparticles as a fluorescent probe in real sample. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 412, n. 13, p. 3083-3090, 9 mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02558-z>. Acesso em: 5 jan. 2026.

Lakowicz, Joseph R. Principles of fluorescence spectroscopy. 4. ed. New York: Springer, 2020.

LI, Xingyu *et al.* Comprehensive review of emerging contaminants: detection technologies, environmental impact, and management strategies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 278, p. 116420, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LI, Yiqi *et al.* Research progress of fluorescent composites based on cyclodextrins: preparation strategies, fluorescence properties and applications in sensing and bioimaging. **Analytica Chimica Acta**, v. 1316, p. 342878, ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.342878>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LI, Ruonan *et al.* Silicon quantum dots based fluorescent probes for detecting methyl parathion pesticide residues in potato, tap water and Yellow River. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 325, p. 125071, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125071>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LIU, Piaotong *et al.* A dual-emission ratiometric fluorescent probe based on carbon quantum dots and a lanthanide MOF for the selective detection of TNT and Fe³⁺ in aqueous phase. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, p. 127265, nov. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.127265>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LIU, Shi-Tao *et al.* Construction of rhodamine-based fluorescent sensor for fast, on-site quantitative detection of hazardous salicylic acid in practical sample analysis. **Food Chemistry**, X, v. 24, p. 101992, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101992>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LIU, Yongli *et al.* Selective fluorescent probe for sensitive determination of bisphenol A based on molecularly imprinted polymers decorated carbon dots derived from citric acid and ethylenediamine. **Chemosphere**, p. 138303, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138303>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LIU, Xiqing *et al.* Molecularly imprinted polymers-captivity ZnO nanorods for sensitive and selective detecting environmental pollutant. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 228, p. 117785, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117785>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LOPARDO, Luigi; RYDEVIK, Axel; KASPRZYK-HORDERN, Barbara. A new analytical framework for multi-residue analysis of chemically diverse endocrine disruptors in complex environmental matrices utilising ultra-performance liquid chromatography coupled with high-resolution tandem quadrupole time-of-flight mass spectrometry. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 411, n. 3, p. 689-704, 22 nov. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00216-018-1483-y>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LU, Yang *et al.* Discrimination of tetracycline in water using a fluorescence probe based on UiO-67 Encapsulated with NCDs. **Microchemical Journal**, v. 207, p. 111962, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111962>. Acesso em: 5 jan. 2026.

LU, Xia; BIAN, Xia; FAN, Zhefeng. Fluorescence sensor for rapid identification of naproxen enantiomers using carbon quantum dot cyclodextrin complex and its application in the field of biological imaging. **Chinese Journal of Analytical Chemistry**, p. 100681, nov. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cjac.2025.100681>. Acesso em: 5 jan. 2026.

MA, Wen-Jing *et al.* Development of benzothiazole-derived rhodamine fluorescent probes for sensitive, rapid, and reversible detection and imaging of salicylic acid in food samples and plants. **Sensors and Actuators B: Chemical**, p. 133948, maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133948>. Acesso em: 5 jan. 2026.

MAJID, Abdul *et al.* A green facile fluorescent sensor based on APTES-modified carbon quantum dots coupled with molecular imprinting for efficient detection of metronidazole in aqueous environment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 74, p. 107816, maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107816>. Acesso em: 5 jan. 2026.

NAKAYA, Yuki; TOMITA, Ayaka; YAMAMURA, Hiroshi. Solid-phase fluorescence: reproducibility and comparison with the solution states. **Talanta**, v. 270, p. 125566, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.125566>. Acesso em: 5 jan. 2026.

Nsibande, S. A.; Forbes, P. B. C. Development of a turn-on graphene quantum dot-based fluorescent probe for sensing of pyrene in water. **RSC Advances**, v. 10, n. 21, p. 12119-12128, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/c9ra10153e>. Acesso em: 5 jan. 2026.

OLUWOLE, Adewumi Olufemi; OLATUNJI, Olatunde Stephen. Synthesis and characterization of binary bismuth tungstate-graphitic carbon nitride (BWO/g-C₃N₄) heterojunction nanocomposites for efficient photodegradation of ibuprofen in aqueous media. **Journal of Water Process Engineering**, v. 54, p. 104045, ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104045>. Acesso em: 5 jan. 2026.

PENA-PEREIRA, Francisco; WOJNOWSKI, Wojciech; TOBISZEWSKI, Marek. AGREE—Analytical greenness metric approach and software. **Analytical Chemistry**, v. 92, n. 14, p. 10076-10082, 15 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01887>. Acesso em: 24 nov. 2025.

PU, Qi *et al.* A ratiometric fluorescent dark box and smartphone integrated portable sensing platform based on hydrogen bonding induction for on-site determination of enrofloxacin. **Food Chemistry**, v. 455, p. 139876, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139876>. Acesso em: 5 jan. 2026.

QIN, Weidong *et al.* Iron and copper codoped carbon nanodots as oxidase mimics and fluorescent probes for detection of phenol and dimethoate. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 331, p. 125794, abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.125794>. Acesso em: 5 jan. 2026.

RAMADAN, Lama *et al.* Development of LC–MS/MS method for the simultaneous detection of emerging contaminants in aquatic matrices. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, n. 8,

19 jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07342-8>. Acesso em: 29 dez. 2025.

RANI, Umairah Abd *et al.* A review of carbon quantum dots and their applications in wastewater treatment. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 278, p. 102124, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102124>. Acesso em: 24 nov. 2025.

RATHI, B. Senthil; KUMAR, P. Senthil; SHOW, Pau-Loke. A review on effective removal of emerging contaminants from aquatic systems: current trends and scope for further research. **Journal of Hazardous Materials**, p. 124413, out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124413>. Acesso em: 24 nov. 2025.

REN, Chunxiao *et al.* Metal/non-metal doped graphene quantum dots as dual fluorescent probes for detection of pesticide residues and heavy metal ions. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, p. 126886, ago. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.126886>. Acesso em: 24 nov. 2025.

RENU *et al.* Rational design of Boerhavia diffusa derived CoFe₂O₄-Carbon dots@Boehmite platform for photocatalysis and ultra trace monitoring of hazardous pesticide and UO₂²⁺ ions. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 325, p. 125111, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.125111>. Acesso em: 5 jan. 2026.

SAHU, Pradeep *et al.* Fluorescent rhodamine sensors for mercury, iron, and copper ion detection in water: mechanisms and applications. **Journal of Fluorescence**, 16 abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10895-025-04292-0>. Acesso em: 24 nov. 2025.

SATHIYAN, Govindasamy; VENKATESAN, Geetha; BENJAMIN, Michael. Recent advances in organic fluorescent and hybrid chemosensors for Lead ion detection in environmental applications. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 550, p. 217384, mar. 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217384>. Acesso em: 5 jan. 2026.

SERAG, Ahmed *et al.* A fluorescent sensor based on nitrogen-doped graphene quantum dots and molecularly imprinted polymers for selective and sensitive detection of meropenem in environmental and clinical matrices. **Talanta**, p. 128442, jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128442>. Acesso em: 5 jan. 2026.

SHANMUGARAJU, Sankarasekaran *et al.* Recent advances in fluorescence-based chemosensing of organoarsenic feed additives using luminescence MOFs, COFs, HOFs, and QDs. **Chemical Communications**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/d3cc03125j>. Acesso em: 24 nov. 2025.

TANG, Ruijie *et al.* Ratiometric fluorescent sensor for sensitive visualization of full-spectrum fluoroquinolone antibiotic residues in the environment. **Microchemical Journal**, p. 113260, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113260>. Acesso em: 5 jan. 2026.

THULASI, Sekar; KATHIRAVAN, Arunkumar; ASHA JHONSI, Mariadoss. Fluorescent carbon dots derived from vehicle exhaust soot and sensing of tartrazine in soft drinks. **ACS**

Omega, v. 5, n. 12, p. 7025-7031, 18 mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00707>. Acesso em: 5 jan. 2026.

Valeur, Bernard; Berberan-Santos, Mario N. Molecular fluorescence: principles and applications. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.

XIANG, Qian *et al.* A dual quantum dots-based ratio fluorescent probe for detecting Glyphosate in agricultural products. **Microchemical Journal**, v. 212, p. 113214, maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113214>. Acesso em: 5 jan. 2026.

WANG, Min *et al.* A sensitive and selective fluorescent sensor for 2,4,6-trinitrophenol detection based on the composite material of magnetic covalent organic frameworks, molecularly imprinted polymers and carbon dots. **Microchemical Journal**, v. 154, p. 104590, maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104590>. Acesso em: 5 jan. 2026.

WANG, Kunpeng *et al.* A molecular imprinted fluorescence sensor based on carbon quantum dots for selective detection of 4-nitrophenol in aqueous environments. **Marine Pollution Bulletin**, v. 187, p. 114587, fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114587>. Acesso em: 5 jan. 2026.

WEI, Xinzhuang *et al.* Fluorescence sensor based on molecularly imprinted polymer and bimetallic Tb/Ce MOF for sensitive detection of thiamethoxam. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 347, p. 127005, fev. 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.127005>. Acesso em: 5 jan. 2026.

YANG, Yu-Fan *et al.* A fluorescence sensor for the detection of zearalenone based on magnetic molecular imprinted polymers and carbon dots. **Journal of Food Composition and Analysis**, p. 107185, jan. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.107185>. Acesso em: 5 jan. 2026.

YE, Leikai *et al.* Highly selective and sensitive detection of trace amoxicillin with a novel fluorescent nanoprobe N, S-CDs@MIP based on S/N co-doped carbon quantum dots combined with molecularly imprinted polymer. **Journal of Water Process Engineering**, v. 71, p. 107291, mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107291>. Acesso em: 5 jan. 2026.

YIN, Yang *et al.* Enhancing the photo-induced oxidase-like activity of fluorescein with methyl viologen for colorimetric detection of organophosphorus pesticide. **Food Chemistry**, v. 465, p. 142164, fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142164>. Acesso em: 5 jan. 2026.

YU, Zhaochuan *et al.* Microwave-Assisted synthesis of N, S co-doped carbon quantum dots for fluorescent sensing of Fe(III) and hydroquinone in water and cell imaging. **Nanomaterials**, v. 14, n. 22, p. 1827, 14 nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano14221827>. Acesso em: 5 jan. 2026.

ZHAO, Xinming *et al.* Visual detection of ciprofloxacin using a multi-emission ratiometric fluorescence sensor based on the molecularly imprinted polymers doped with terbium(III)

ions. **Talanta**, v. 286, p. 127537, maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.127537>. Acesso em: 5 jan. 2026.

ZHANG, Zhijun *et al.* Machine learning-assisted carbon quantum dots-molecularly imprinted polymer array for synchronous screening of multiple sulfonamides. **Sensors and Actuators B: Chemical**, p. 138374, jul. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2025.138374>. Acesso em: 5 jan. 2026.

ZHANG, Qi *et al.* Biomimetic ratiometric fluorescence sensor based on perovskite quantum dots and carbon dots for ultrasensitive ciprofloxacin detection. **Journal of Hazardous Materials**, v. 490, p. 137845, jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137845>. Acesso em: 5 jan. 2026