

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
Programa de Pós-Graduação em Química

VANDERLI GARCIA LEAL

DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA IOT DE BAIXO CUSTO PARA
MONITORAMENTO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS UTILIZANDO
VEÍCULOS AÉREOS

Uberlândia – MG
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
Programa de Pós-Graduação em Química - Doutorado

DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA ANALÍTICA IOT DE BAIXO CUSTO
PARA MONITORAMENTO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM VEÍCULOS
AÉREOS

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Química da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para obtenção do título de Doutor em Química.

Aluno: Me Vanderli Garcia Leal
Orientador: Prof. Dr. João Flávio da Silveira Petrucci
Área de concentração: Química Analítica

Uberlândia – MG
2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

L435
2025 Leal, Vanderli Garcia, 1982-
DESENVOLVIMENTO DE PLATAFORMA ANALÍTICA IOT DE BAIXO
CUSTO PARA MONITORAMENTO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM
VEÍCULOS AÉREOS [recurso eletrônico] / Vanderli Garcia Leal. -
2025.

Orientador: João Flávio da Silveira Petrucí.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-
graduação em Química.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.501>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Química. I. Petrucí, João Flávio da Silveira, 1983-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Química.
III. Título.

CDU: 54

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Química
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 5I - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4385 - www.cpgquimica.iq.ufu.br - cpgquimica@ufu.br



ATA

Programa de Pós-Graduação em:	Química				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, 169, PPGQUI				
Data:	Vinte e sete de junho de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	9:00	Hora de encerramento:	13:15
Matrícula do Discente:	12113QMI009				
Nome do Discente:	Vanderli Garcia Leal				
Título do Trabalho:	"Desenvolvimento de plataforma IoT de baixo custo para monitoramento de poluentes atmosféricos utilizando veículos aéreos"				
Área de concentração:	Química				
Linha de pesquisa:	Instrumentação analítica e preparo de amostras				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	"Construção de plataformas ópticas portáteis, versáteis e de baixo custo para sensoriamento de vapores e gases em diferentes atmosfera"				
ODS 13	ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima: tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos				

Reuniu-se, presencialmente, no Auditório do PPGQUI, Bloco 5I, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Química, assim composta: Professores Doutores: **Rodrigo Amorim Bezerra da Silva**, da Universidade Federal de Uberlândia -IQ; **Samara Carbone**, da Universidade Federal de Uberlândia- ICIAG; **Rodrigo Sequinel**, da Universidade Federal do Paraná; **Vanessa Nunes Alves**, da Universidade Federal de Catalão; e **João Flávio da Silveira Petrucí**, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, **Dr. João Flávio da Silveira Petrucí**, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao(à) Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.



Documento assinado eletronicamente por **Samara Carbone, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/06/2025, às 13:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Amorim Bezerra da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/06/2025, às 13:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Flávio da Silveira Petrucci, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/06/2025, às 13:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa Nunes Alves, Usuário Externo**, em 27/06/2025, às 13:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Sequinel, Usuário Externo**, em 29/06/2025, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6275241** e o código CRC **470F1DB5**.

VANDERLI GARCIA LEAL

<https://orcid.org/0000-0001-9414-1522>

<http://lattes.cnpq.br/9046897157263366>

1. ATUAÇÃO PROFISSIONAL

Fiscal Assistente Agropecuário

Instituto Mineiro de Agropecuária

Período: out 2009 – atual

2. ARTIGOS PUBLICADOS

LEAL, V. G.; SILVA-NETO, H. A.; SILVA, S. G. da; COLTRO, W. K. T.; PETRUCI, J. F. da S. AirQuality Lab-on-a-Drone: A Low-Cost 3D-Printed Analytical IoT Platform for Vertical Monitoring of Gaseous H₂S. **Analytical Chemistry**, v. 95, p. 14350-14356, 2023.

SOUSA, D. da S.; LEAL, V. G.; DOS REIS, G. T.; DA SILVA, S. G.; CARDOSO, A. A.; PETRUCI, J. F. da S. An Automated, Self-Powered, and Integrated Analytical Platform for On-Line and In Situ Air Quality Monitoring. **Chemosensors**, 2022, 10 (11), 1–13

BARRETO, D. N.; LEAL, V. G.; CONRADO, J. A. M.; et al. Performing reliable absorbance and fluorescence measurements with low budget - A tutorial for beginners. **Química Nova**, v. 44, n. 9, p. 1184–1191, 2021. Sociedade Brasileira de Química.

LEAL, V. G.; BATISTA, A. D.; PETRUCI, J. F. DA. S. 3D-printed and fully portable fluorescent-based platform for sulfide determination in waters combining vapor generation extraction and digital images treatment. **Talanta**. 222, 7. 2021. DOI: 10.1016/j.talanta.2020.121558.

3. PARTICIPAÇÃO CONGRESSOS

XXXIII Encontro Regional da Sociedade Brasileira de Química? Elementos Químicos das Minas Gerais?

20º Encontro Nacional de Química Analítica (ENQA) e 8º Congresso Ibero-Americano de Química analítica, 2022.

21º Encontro Nacional de Química Analítica (ENQA) e 9º Congresso Ibero-Americano de Química analítica, 2024.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me proporcionar saúde para ir em busca dos meus ideais na formação profissional.

Aos meus pais, esposa e irmãos que sempre me apoiaram nessa caminhada com muito incentivo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. João Flávio da Silveira Petrucy pela paciência, prontidão e dedicação na realização deste trabalho, sabendo que sua colaboração nesse trabalho não tenho palavras para descrever o quanto importante foram as contribuições diretamente na minha formação profissional e pessoal.

Agradeço a UFU nas pessoas de todos os professores do IQ-UFU que colaboraram na minha formação e no incentivo para crescimento profissional.

Agradeço a todos os membros do LaMinS por me proporcionar uma segunda casa.

Agradeço a banca examinadora por fazer parte e contribuir para melhoria deste trabalho.

RESUMO

A determinação de compostos gasosos na atmosfera é uma tarefa desafiadora devido à faixa de concentração reduzida em que esses são encontrados e a presença de múltiplos interferentes. Além disso, o monitoramento do ar envolve uma questão logística, principalmente quando se considera áreas com pouca acessibilidade ou a necessidade de amostragem vertical. Neste trabalho, é apresentado um laboratório analítico miniaturizado, impresso em 3D, totalmente integrado a um drone (*Lab-on-a-drone*) dedicado ao monitoramento de H_2S gasoso. A plataforma analítica portátil utiliza a abordagem da internet das coisas (IoT), permitindo a amostragem, determinação e transmissão dos resultados da concentração de H_2S de maneira automatizada. O método analítico empregado foi baseado na reação entre o reagente acetato de fluoresceína de mercúrio (AFM) e H_2S , que resulta na supressão da fluorescência em 525 nm. Uma microbomba de 5V fornece fluxo de ar constante de 50 mL min^{-1} e foi empregada para amostragem do ar em um frasco contendo $800 \mu\text{L}$ do reagente. A medida de fluorescência foi obtida usando um LED com emissão em 470 nm e um detector de luz digital miniaturizado. O método químico permitiu a detecção de H_2S na faixa de 15 a 200 ppbv, com reprodutibilidade de 6% para um tempo de amostragem de 10 min e limite de detecção de 9 ppbv. Sensores de umidade e temperatura foram empregados para fornecer informações adicionais sobre as condições ambientais. Todos os dispositivos foram programados e controlados por meio de um Arduino alimentado por uma bateria portátil e os resultados foram transmitidos para um smartphone via Bluetooth. O dispositivo proposto resultou em um peso de 300 g e um custo total de aproximadamente de 300 BRL. A plataforma foi usada para monitorar a concentração de H_2S em diferentes intervalos ao lado de uma estação de tratamento de águas residuais nos níveis

de solo e vertical (10 e 20 metros). A capacidade de executar todas as etapas analíticas no mesmo dispositivo, os requisitos de baixa energia, o baixo peso e a conexão de módulos de transmissão de dados oferecem novas possibilidades para sistemas analíticos baseados em drones para monitoramento da poluição do ar.

ABSTRACT

The determination of gaseous compounds in the atmosphere is a challenging task due to their limited concentration range and the presence of multiple interfering factors. Furthermore, air monitoring involves logistical issues, especially when considering areas with limited accessibility or the need for vertical sampling. This paper presents a miniaturized, 3D-printed analytical laboratory fully integrated with a drone (Lab-on-a-drone) dedicated to monitoring gaseous H₂S. The portable analytical platform uses an Internet of Things (IoT) approach, enabling automated sampling, determination, and transmission of H₂S concentration results. The analytical method employed was based on the reaction between the reagent acetate fluorescein mercury (AFM) and H₂S, which results in fluorescence quenching at 525 nm. A 5V micropump provides a constant airflow of 50 mL min⁻¹ and was used to sample the air in a vial containing 800 µL of the reagent. Fluorescence measurements were obtained using a 470 nm LED and a miniaturized digital light detector. The chemical method allowed H₂S detection in the 15–200 ppbv range, with a 6% reproducibility for a 10 min sampling time and a detection limit of 9 ppbv. Humidity and temperature sensors were used to provide additional information on environmental conditions. All devices were programmed and controlled using an Arduino powered by a portable battery, and the results were transmitted to a smartphone via Bluetooth. The proposed device weighed 300 g and cost approximately BRL 300. The platform was used to monitor H₂S concentration at different intervals next to a wastewater treatment plant at ground and vertical levels (10 and 20 meters). The ability to perform all analytical steps on the same device, low power requirements,

low weight, and the connection of data transmission modules offer new possibilities for drone-based analytical systems for air pollution monitoring.

Lista de figura

Figura 1: Ciclo do enxofre representado esquematicamente -----	15
Figura 2. Balão cativo implementado para análise vertical -----	22
Figura 3. Esquema de Satélite de sensoriamento remoto -----	24
Figura 4. O princípio de funcionamento do sistema LiDAR -----	26
Figura 5. plataforma de determinação de sulfeto (a) componentes e (b) montados e prontos para uso -----	33
Figura 6. Tipos de Sensores e princípios de funcionamento -----	34
Figura 7. Diagrama de Jablonski -----	40
Figura 8. Esquema do primeiro fotômetro de absorção com uso de LED- -----	44
Figura 9. Esquema do sistema de geração de padrão gasoso -----	59
Figura 10. Diagrama esquemático da plataforma analítica para sensoriamento de H ₂ S -----	60
Figura 11. Modelo 3D da plataforma lab-on-a-drone para monitoramento da qualidade do ar. (A) desmontado; (B) montado -----	61
Figura 12. Circuito impresso do sistema elétrico da plataforma (A) Placa cobreada com impressão (B) Placa com as trilhas após a oxidação do cobre.-----	63
Figura 13. Modelo 3D da plataforma lab-on-a-drone configuração completa para monitoramento da qualidade do ar -----	64
Figura 14. Avaliação da corrente na estabiliza o sinal analítico -----	67
Figura 15. Variação da massa com variação do tempo (A) e em função da vazão (B) -----	70
Figura 16. Variação do sinal analítico em função do tempo de amostragem usando diferentes fluxos de ar na amostragem -----	72
Figura 17. Sinal analítico medido a partir da interação entre AFM e outros poluentes atmosféricos. Condições experimentais: Fluxo de amostragem: 50 mL min ⁻¹ . Concentração dos gases: NO ₂ : 255 ppbv, O ₃ : 200 ppbv; NH ₃ : 130 ppbv; CH ₂ O: 240 ppbv; H ₂ S: 100 ppbv -----	73
Figura 18. Os 12 princípio da química verde (A) Pontuação de greenness obtida com o software AGREE (B). -----	77

Lista de tabela

Tabela 01. Efeito da concentração de sulfeto de hidrogênio -----	16
Tabela 02. Pesquisa realizada usando LED com fonte de radiação -----	47
Tabela 03. Pesquisa realizada usando sensores de luz para análise química -----	54
Tabela 04. Parâmetros analíticos obtidos pelo sistema de detecção baseado em LED projetado usando AFM como um fluoróforo -----	68
Tabela 05. Parâmetros analíticos e condições otimizadas da plataforma analítica proposta para quantificação de H ₂ S -----	74
Tabela 06. Concentração encontrada resumida de H ₂ S em ppbv obtida pela plataforma lab-on-drone para um tempo de amostragem de 10 min em diferentes altitudes -----	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC – Analog-to-Digital converter

AFM – Acetato de Fluoresceína de Mercúrio

BRS – Bactérias Redutoras de Sulfeto

IoT – Internet das coisas

IR – Infravermelho

LD – Limite de Detecção

LDR – Light Dependent Resistor

LED – Light Emitting Diodo

LiDAR – Light Detection and Ranging

LQ – Limite de Quantificação

OMS – Organização Mundial da Saúde

PCB – Printed Circuit Board

PPBV – Parte por Bilhão em Volume

PTFE – Politetrafluoretileno

RSD – Relative Standard Deviation

UV – Ultravioleta

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Poluição atmosférica e qualidade do ar	12
1.2 Ciclo biogeoquímico do enxofre	14
1.3 Monitoramento da qualidade do ar	19
1.4 Instrumentos e métodos analíticos	20
1.4.1 Balão cativo	21
1.4.2 Satélites de sensoriamento remoto	23
1.4.3 Sistemas Light Detection and Ranging (LIDAR)	25
1.4.4 Espectrofotômetros terrestres	27
1.4.5 Uso de drones para monitoramento atmosférico	28
1.5 Métodos analíticos para determinação de H ₂ S	30
1.6 Sensores em química analítica	34
1.7 Espectroscopia	37
1.7.1 Espectroscopia de fluorescência molecular	38
1.8 Uso de LEDs em química analítica (medidas de absorvância e fluorescência)	43
1.9 Uso plataforma automatizada com sensor de luz na química analítica ...	48
1.9.1 Arduino na automatização	48
1.9.2 Sistema de sensor de luz	50
1.10 Impressão 3D em análise química	55
2 Objetivos	57

2.1 Objetivo geral	57
2.2 Objetos específicos	57
3 Materiais e Métodos	58
3.1 Reagentes e soluções padrão gasosas	58
3.2 Montagem da plataforma analítica	59
3.3 Protocolo de montagem e análise de laboratório em um drone	63
4 Resultados e discussão.....	66
4.1 Projeto da plataforma analítica: O sistema de detecção	66
4.2 Otimização do método analítico para determinação de H ₂ S gasoso	68
4.3 Aplicação da plataforma analítica “lab-on-a-drone” para monitoramento de H ₂ S.....	74
4.4 Avaliação da métrica verde do método apresentado.	77
5 Conclusão	79
Referência bibliográficas	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Poluição atmosférica e qualidade do ar

De acordo com a organização Mundial da Saúde (OMS), a poluição atmosférica em ambientes externos é uma preocupação global e responsável por mais de 4 milhões de mortes anualmente (WHO, 2023). Segundo a resolução CONAMA 003/90, entende-se como poluente atmosférico qualquer substância química presente em uma determinada concentração em desacordo com os níveis estabelecidos, e que, portanto, tornem ou possam tornar o ar:

I - Impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;

II - Inconveniente ao bem-estar público;

III - danoso aos materiais, à fauna e flora.

IV - Prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Alguns tipos de compostos químicos estão presentes, sejam por emissões naturais ou antrópicas, em concentrações suficientes para causar danos à saúde dos seres vivos, dos vegetais ou em materiais. Exemplo destes compostos são o dióxido de enxofre (SO_2) e o ozônio (O_3). O SO_2 entra na atmosfera como resultado de fenômenos naturais e atividades antropogênicas, por exemplo, erupções vulcânicas, queima de combustíveis que contém enxofre, como óleo diesel, óleo combustível industrial e gasolina. É um dos principais formadores da chuva ácida pela formação do ácido sulfúrico. A produção deste ácido ocorre pela simples reação de SO_2 com água. O dióxido de enxofre pode reagir com outras substâncias presentes no ar formando partículas de sulfato que são

responsáveis pela redução da visibilidade na atmosfera. O limite de exposição de SO₂ em um período de 24 horas não pode ser superior a 40 µg m³ (WHO, 2021).

O O₃ não é um poluente emitido diretamente por fontes primárias. Em vez disso, ele abrange um grupo de espécies químicas formadas por meio de uma série de reações complexas na atmosfera impulsionadas pela energia transferida para moléculas de dióxido de nitrogênio (NO₂) quando absorvem luz da radiação solar. Os precursores que mais contribuem para a formação do O₃ em atmosferas poluídas são o dióxido de nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis (COVs), especialmente os COVs insaturados. As novas diretrizes de qualidade do ar (OMS), recomendam que a concentração média de ozônio de 8 horas na temporada de pico não exceda 60 µg m³ (WHO, 2021).

O monitoramento da qualidade do ar atmosférico é considerado uma tarefa essencial para: (i) garantir que a população e os governantes estejam cientes do estado de poluição de uma determinada área, (ii) agir prontamente em casos de variação abrupta das concentrações de poluentes para a segurança da população; e (iii) ajudar a explicar os mecanismos das reações atmosféricas em fase gasosa. Embora a maioria das agências reguladoras mundiais tenha estabelecido apenas seis poluentes atmosféricos principais que devem ser monitorados no mundo todo, existem muitos outros compostos prejudiciais à saúde e prejudiciais ao meio ambiente que precisam ser monitorados. A presença de poluentes na atmosfera depende de diversos fatores, como tipos de atividades urbanas, indústrias, incidência de radiação solar, presença de sistemas aquáticos, etc (SCHNEIDER, 2017). Entretanto, apesar de ser um tópico de extrema relevância, a OMS estima que o ar atmosférico que 91% da

população mundial respira não contém informações completas sobre sua composição (WHO, 2023). Dentro desse contexto, os compostos de enxofre possuem uma grande importância na química da atmosfera e serão abordados na próxima seção.

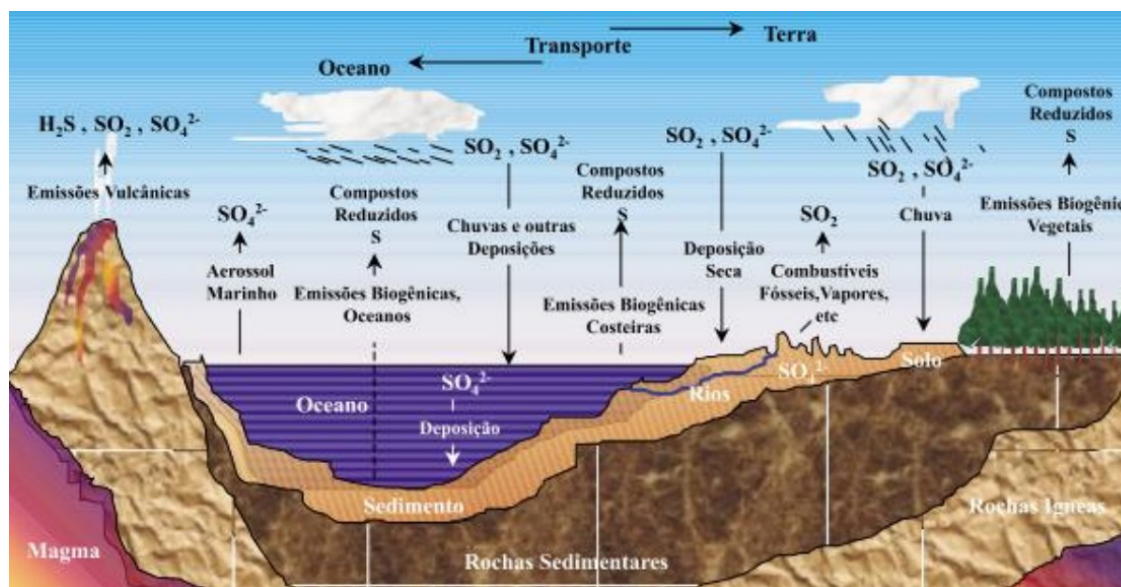
1.2 Ciclo biogeoquímico do enxofre

Segundo Guimaraes Junior (2022), os ciclos Biogeoquímicos são processos químicos que ocorrem na atmosfera e hidrosfera e representam o movimento dos elementos químicos entre os seres vivos e a atmosfera, litosfera e hidrosfera do planeta. Durante um ciclo biogeoquímico, os elementos são absorvidos por seres vivos e são responsáveis por várias e diferentes reações químicas fundamentais para a sobrevivência desses organismos, retornando ao ambiente por processo de decomposição, transpiração, respiração e eliminação de fezes. Assim sendo, fica nítido que a matéria é reciclada e que os elementos não são criados nem destruídos. Em um ecossistema natural, sem intervenção do homem, esses ciclos permanecem em um constante equilíbrio. O ciclo Biogeoquímico pode ser classificado em ciclos gasosos que possuem como principal reservatório a atmosfera e ciclo sedimentar que possuem como reservatório a crosta terrestre.

O ciclo do enxofre é formado por reações de redução e oxidação, os quais podem ser realizadas tanto por vias biológicas quanto químicas. A figura 1 apresenta um esquema do ciclo do enxofre. A principal fonte de enxofre no solo é encontrada em sedimentos, combustíveis fósseis, rochas como gesso (CaSO_4) e pirita (FeS_2). Nos oceanos, o enxofre é encontrado na forma de sulfato e dimetilsulfeto (CH_3SCH_3) (KOYDON, 2004). Por meio de processos biológicos,

diferentes espécies de microrganismos convertem os compostos de enxofre em espécie com diferentes estados de oxidação. Um exemplo é a redução dissimilatória do sulfato a sulfeto por ação das bactérias em condições anaeróbias (MADIGAN et al., 2002).

Figura 1. Ciclo do enxofre representado esquematicamente (MARTINS, 2002)



Na atmosfera, por sua vez, o enxofre pode estar presente na forma reduzida (H_2S) e na forma oxidada (SO_2). A capacidade de fazer ligações químicas e elevada abundância relativa faz com que uma variedade de compostos de enxofre seja encontrada com diferentes estados de oxidação, variando de -2 (totalmente reduzido) até +6 (totalmente oxidado). Por possuir baixa massa molecular, grande parte dos compostos de enxofre tem tendência de ser gasoso ou potencialmente volatizáveis. Os principais compostos voláteis presentes na forma reduzida são: sulfeto de metila, sulfeto de dimetila, sulfeto de carbonila, dissulfeto de carbono e sulfeto de hidrogênio. Esses compostos

também são chamados de compostos reduzidos de enxofre (KOMARNISKY, 2003; CRUZ, 2008).

Um dos compostos reduzidos de enxofre e importante poluente presente na dinâmica da atmosfera de cidades é o sulfeto de hidrogênio (H₂S). Ele é um gás incolor que apresenta odor desagradável, semelhante ao cheiro de ovo podre, e altamente tóxico à saúde humana. O H₂S produz irritações nas mucosas nasais e nas vias respiratórias. Sendo as vias respiratórias o principal meio de exposição do H₂S, o gás é absorvido rapidamente pelos pulmões (MAINIER, 2003). O limite de percepção do odor é de 0,5 ppb, mas a fadiga olfativa pode ocorrer tanto em altas ou em baixas concentrações (EPA, 2024).

A gravidade dos efeitos à saúde está relacionada ao tempo de exposição e à concentração de H₂S. Por exemplo, longas exposições a H₂S em concentração de cerca de 30 partes por milhão em volume (ppmv) podem resultar em doença pulmonar obstrutiva crônica, enquanto dois ciclos respiratórios completos de 1000 partes por milhão em volume (ppmv) de H₂S podem ser letais (GUIDOTTI, 2010). A tabela 1 apresenta uma relação entre a concentração de sulfeto de hidrogênio com potenciais efeitos na saúde humana.

Tabela 1. Efeito da concentração de sulfeto de hidrogênio (OSHO 2023)

Concentração (ppm)	Sintomas/Efeitos
0,01-1,5	Limiar de odor (quando o cheiro de ovo podre é percebido pela primeira vez para alguns). O odor se torna

	mais ofensivo em 3-5 ppm. Acima de 30 ppm, o odor é descrito como doce ou enjoativamente doce.
2-5	A exposição prolongada pode causar náusea, lacrimejamento, dores de cabeça ou perda de sono. Problemas nas vias aéreas (constrição brônquica) em alguns pacientes com asma.
20	Possível fadiga, perda de apetite, dor de cabeça, irritabilidade, memória fraca, tontura.
50-100	Conjuntivite leve ("olho gasoso") e irritação do trato respiratório após 1 hora. Pode causar distúrbios digestivos e perda de apetite.
100	Tosse, irritação nos olhos, perda do olfato após 2-15 minutos (fadiga olfativa). Respiração alterada, sonolência após 15-30 minutos. Irritação na garganta após 1 hora. Aumento gradual na gravidade dos sintomas ao longo de várias horas. A morte pode ocorrer após 48 horas.
100-150	Perda do olfato (fadiga ou paralisia olfativa).
200-300	Conjuntivite acentuada e irritação do trato respiratório após 1 hora. Edema pulmonar pode ocorrer devido à exposição prolongada.
500-700	Cambaleando, colapso em 5 minutos. Danos sérios aos olhos em 30 minutos. Morte após 30-60 minutos.

	Inconsciência rápida, "knockdown" ou colapso imediato
700-1000	em 1 a 2 respirações, parada respiratória, morte em minutos.
1000-2000	Morte quase instantânea

O H_2S apresenta uma densidade maior que o ar, propriedade que pode dificultar sua dispersão na atmosfera, dependendo das condições climáticas. As fontes de emissão de H_2S são principalmente de efluentes industriais e esgotos sanitários ricos em sulfato, por meio da sua redução para sulfeto (S^{2-}) pela ação das bactérias redutoras de sulfeto (BRS) em condições anaeróbias e consequente formação do gás sulfeto de hidrogênio. As formas estáveis do sulfeto dependem do pH: se for ácido, o sulfeto permanecerá na forma volátil, como H_2S ; o HS^- é a forma predominante em pH neutro; S^{2-} é a forma dominante em pH alcalino (KOYDON, 2004). Outros processos e fontes de emissão importantes de H_2S para atmosfera são: Produção e refino de petróleo, silos e poços agrícolas, fabricação de produtos têxteis, processamento de celulose e papel, processamento de alimentos e pavimento em asfalto quente. O H_2S é parcialmente solúvel em água, com solubilidade a 20°C de 3850 mg L^{-1} . Com o aumento da temperatura, a solubilidade decresce cerca de 2% a cada grau de variação (MAINIER, 2005).

O Órgão de Segurança e Saúde Pública dos Estados Unidos – OSHA (Occupational Safety and Health Administration) - no período de 1984 a 1994, registou 80 mortes causada por H_2S , sendo 56 mortes diretas de envenenamento e 24 mortes de pessoas que tentaram salvar os colegas, dessas mortes, 60 ocorreram em estabelecimentos comerciais de vários segmentos,

enquanto 18 ocorreram na produção e refino de gás natural e petróleo (MAINIER, 2003). No Brasil há poucos relatos de morte por acidentes com vazamentos de H_2S , ano de 1996 O jornal Estado de S. Paulo informou que três operários morreram no Rio Grande do Sul ao entrar em um silo de estocagem de grão contendo milho. A decomposição do milho gerou altas concentrações de H_2S causando a morte dos operários.

A população que reside em áreas próximas a estações de tratamento de esgoto está frequentemente exposta ao odor desagradável proveniente da emissão de H_2S . Segundo OSHO (2023), o limite de exposição permitido de H_2S é de 20 ppm e não deve ser excedido em nenhum momento durante um turno de 8 horas, exceto se a exposição for de 50 ppm por não mais de 10 minutos em um turno de 8 horas, desde que nenhuma outra exposição mensurável ocorra. Por outro lado, a legislação do estado de Minas Gerais não estabelece uma concentração limite máxima de H_2S . A obtenção de dados sobre a concentração de H_2S e sua distribuição vertical podem ser uma ferramenta muito útil para descrever sua distribuição espacial a partir de uma fonte de emissão estacionária, como um lago de tratamento de efluentes.

1.3 Monitoramento da qualidade do ar

O monitoramento da qualidade do ar atmosférico é realizado por meio da determinação da concentração dos poluentes usando instrumentos específicos posicionados em bases fixas distribuídos em grandes áreas urbanas (BRAUER et al, 2015). A amostragem de componentes traços atmosféricos torna um desafio constante, pois o ar atmosférico é um sistema heterogêneo e multifásico, constituído de gases, partículas líquidas, sólidas e heterogêneas, cuja

composição varia espacial e temporalmente, é provavelmente a matriz ambiental mais difícil para se obter amostras representativas (CRUZ, 2008).

Tais estações de monitoramento da qualidade do ar estão localizadas principalmente no centro da cidade, parques, escolas e outros locais que possam fornecer informações sobre o ar ao qual a população está exposta. Embora esses dados sejam valiosos, os resultados fornecidos por essas estações ficam limitados em termos de resolução espacial, o que pode ser crítico para cenários de regiões altamente poluidoras. Além disso, medições verticais raramente são permitidas por este tipo de estação (WAGNER et al., 2010). Outro ponto a ser considerado são as grandes variações latitudinais na concentração de poluentes atmosféricos que têm sido observadas na baixa troposfera, uma vez que as emissões locais não são o único fator que regula os níveis de concentração de compostos gasosos na atmosfera (QIAN et al., 2021).

Portanto, é fundamental que a concentração de gases, como o sulfeto de hidrogênio gasoso, seja monitorada na atmosfera. Além disso, o desenvolvimento de plataformas analíticas que permitam o monitoramento vertical de poluentes atmosféricos é de importância essencial para se conhecer o ar que respiramos. Para isso, plataformas analíticas automatizadas que permitam a amostragem, determinação e obtenção dos resultados devem ser desenvolvidas para garantir a segurança da população que está diretamente em contato com esse composto.

1.4 Instrumentos e métodos analíticos

A exigência por técnicas exatas, confiáveis e sensíveis para o monitoramento de elementos traços atmosféricos tem aumentado

continuamente. As razões incluem não apenas a crescente preocupação com a qualidade ambiental, mas pelo fato da poluição atmosférica não ser um problema apenas de um determinado local. Portanto, informações seguras sobre elementos do ar são necessárias para o entendimento do seu comportamento químico e físico na atmosfera, e para identificar, solucionar ou controlar um problema ambiental (CRUZ, 2008).

Algumas técnicas para obtenção de dados relacionados as concentrações verticais de poluentes na atmosfera são relatadas na literatura, como por exemplo o uso de balões cativos, satélites de sensoriamento remoto, sistemas LIDAR (Light Detection and Ranging) e espectrofotômetros terrestres (TARASICK et al., 2019; VILLA et al., 2017).

1.4.1 Balão cativo

A utilização de um balão cativo, com subida e descida controladas, permite que propriedades atmosféricas sejam obtidas ao longo da altura da camada limite superficial (fig. 2). Os sensores contidos no balão permitem coletar parâmetros adicionais, que possibilitam conhecer de forma mais completa as estratificações das propriedades atmosféricas (CONTI, 2006).

Figura 2. Balão cativo implementado para análise vertical (CONTI, 2006).



A utilização de um balão cativo possibilitou, por exemplo, uma observação detalhada e estudo da estrutura e dinâmica da Camada Limite Noturna (CLN) na Amazônia, sobre uma área desmatada até uma altura de aproximadamente 500 m, por realizar medidas com resolução vertical de 10 m. Os perfis foram obtidos pelo Sistema de Aquisição de Dados Atmosférico (ADAS - "Atmospheric Data Acquisition System") coletando informações sobre temperatura do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento (NEVES, 2010). Em trabalho desenvolvido por Assireu (2019), foi empregado balão cativo para gerar o perfil de temperatura, umidade, intensidade e direção do vento, sendo informações fundamentais para estudos meteorológicos, além de serem fundamentais em etapas de prospecção eólica do potencial em empreendimento na área de energia.

O perfil de CO₂ coletado com um balão cativo foi observada com um analisador a laser on-line de gases de efeito estufa. A concentração de CO₂ na

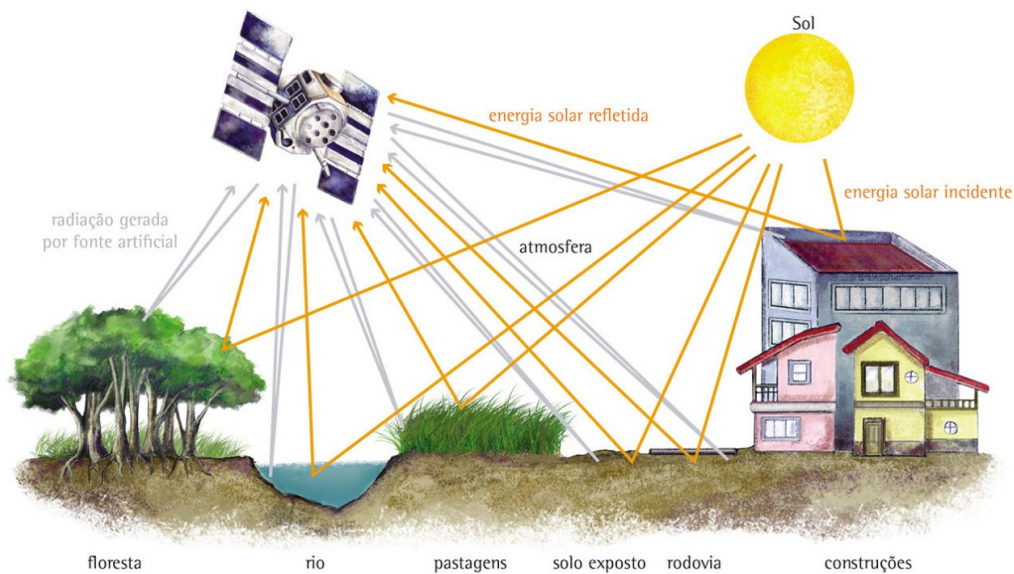
camada superficial foi usado como variável dependente na área de teste de voo quando estabelecemos a superfície aproximada de dióxido de carbono atmosférico (XCO_2). Os resultados mostraram que o XCO_2 médio na área de teste de voo é de cerca de 400 ppm, mostrando que a área urbana é maior comparado com as outras áreas (ZHANG et. al., 2016).

Analisando O_3 com uso de balão cativo com resolução vertical de 100 m, e a resolução temporal de 700 s, as concentrações de ozônio foram em média 34,8 ppb na faixa de 0,3 a 2 km. As concentrações de ozônio observadas abaixo de 700 m exibem um padrão de variação diurna significativo com altos valores ocorrendo no período da tarde. O valor de pico de ozônio a 300 m variou de 49 e 54 ppb (FRAN, 2025).

1.4.2 Satélites de sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto é a aquisição de informações sobre alguma característica de interesse sem entrar em contato direto com ela (fig. 3). Os sistemas de sensoriamento remoto estão disponíveis como uma gama diversificada de sensores e plataformas. O sensor mais comum usado em sensoriamento remoto é um sistema de imagem óptica, que é semelhante em design e aplicação a uma câmera digital padrão, adquirindo dados nos comprimentos de onda visíveis, infravermelhos e térmicos em todo o espectro eletromagnético. Sensores ópticos variam em termos do número de bandas das quais os dados da imagem são capturados. Sensores multiespectrais têm um número limitado de bandas, enquanto sensores hiperespectrais têm milhares de bandas muito mais estreitas (Lechner, 2020).

Figura 3. Esquema de Satélite de sensoriamento remoto (IBGE, 2024)



A capacidade dos instrumentos de satélite de detectar gases em concentração traço e aerossóis na atmosfera depende da refletividade ou emissividade da superfície, nuvens, geometria de visualização e comprimento de onda de recuperação. A detecção de gases traço depende adicionalmente de seu perfil vertical e, para retrodispersão solar de aerossóis. No entanto, a dispersão atmosférica e a emissão resultam em parte da intensidade medida não passando pela camada limite e, portanto, diminuem a sensibilidade do instrumento a gases traço e aerossóis absorventes de ultravioleta perto do solo (MARTIN, 2008).

Com uso de sistema de análise por sensoriamento remoto a pesquisa revelou eventos periódicos simultâneos de alta emissão de metano, NO_2 e CO , indicando a presença de várias fontes de emissão. Uma limitação é que dados de satélite com alta resolução espacial são altamente recomendados para localizar e quantificar precisamente as emissões dessas fontes. No entanto, os resultados obtidos mostraram que pode analisar efetivamente a qualidade do ar

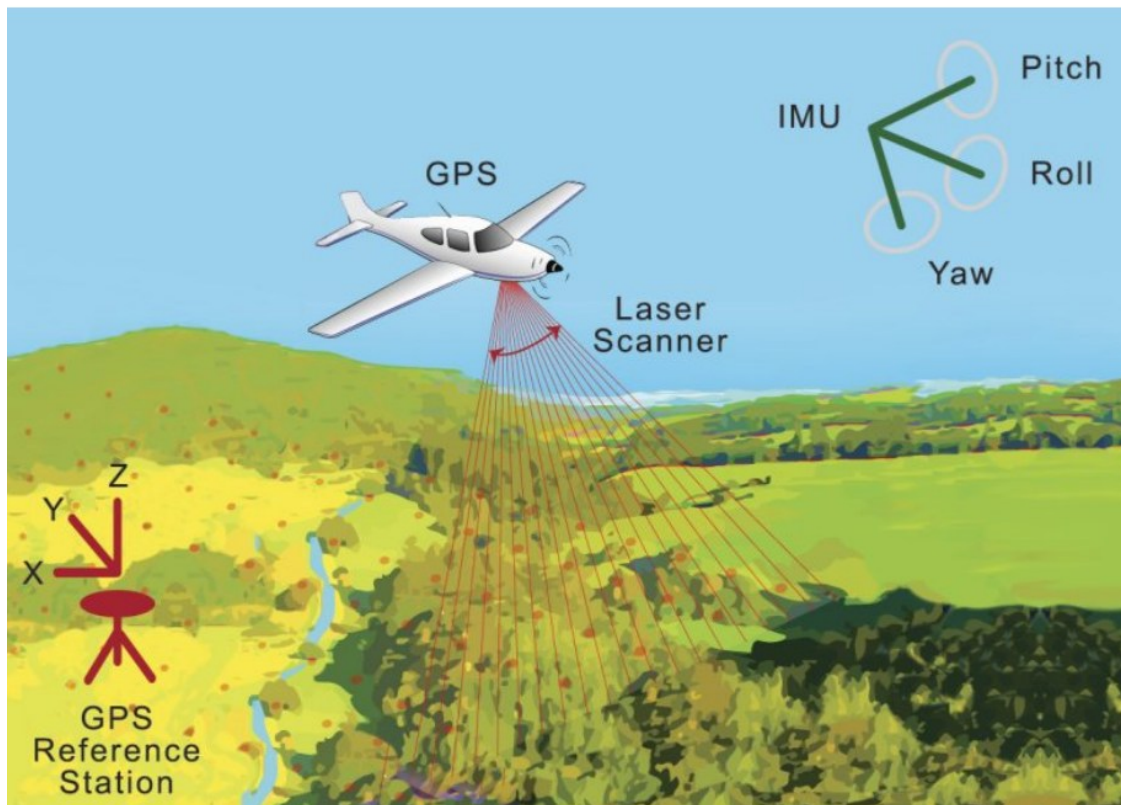
ou a contribuição desses poluentes atmosféricos para as mudanças climáticas regionais e globais (TRENCHÉV, 2023).

Durante os incêndios florestais na Turquia nas cidades de Marmaris e Manavgat no ano de 2021, foram monitoradas as concentrações de NO₂ e CO na atmosfera pelo sensor TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) a bordo do satélite Sentinel-5P e comparada a 10 dias antes do incêndio. Uma média de 92,92 µmol m² de NO₂ foi emitida na atmosfera durante o incêndio em Marmaris, mostrando um aumento de 203,63% e uma média de 0,07 mol m² de CO foi liberada no ar durante o mesmo incêndio, indicando um aumento de 102,47% em comparação com o período de 10 dias antes do incêndio. A mesma variação pode ser observada para o incêndio de Manavgat (YILMAZ, 2024).

1.4.3 Sistemas Light Detection and Ranging (LIDAR)

A tecnologia LiDAR é baseada nos mesmos princípios utilizados no sistema de RADAR, com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o sistema LiDAR utiliza pulsos laser (fig. 4) (GIONGO et al., 2010; SOUZA, 2021). Apesar do laser não ser uma nova tecnologia, o uso em sistemas LiDAR vem demonstrando uma excelente capacidade para a aquisição de uma grande quantidade de informações, em pequeno intervalo de tempo. Inicialmente a tecnologia era prevista para levantamento de dados para elaborar modelos digitais de elevação em áreas de difícil acesso (GIONGO, et al., 2010).

Figura 4. O princípio de funcionamento do sistema LiDAR (LI, 2018).



Esse sistema vem demonstrando grande potencial em outras áreas de aplicação sendo elas planejamento costeiro, telecomunicações, redes de transmissão de energia, avaliação de risco de inundações, florestas, agricultura, petróleo, transportes, planejamento urbano, mineração, detecção remota e física da atmosfera (GIONGO et al., 2010; SOUZA, 2021).

Segundo Silva (2022), o sistema LiDAR pode ser dividido em uma parte transmissora e uma receptora. A parte transmissora é responsável por emitir um feixe de radiação em comprimentos de onda específicos, parte da energia inicial do feixe é perdida pelo espalhamento com gases e aerossóis presentes na atmosfera, enquanto os fótons espalhados dentro do campo de visão da parte receptora constituem o sinal do LiDAR. Essa parte é responsável por receber e processar os fótons retroespalhados de volta na direção do equipamento. Os

fótons que atingem a área de detecção seguem um caminho óptico, que passa por filtros para seleção do comprimento de onda, até chegar ao detector óptico, tipicamente uma fotomultiplicadora.

Medições simultâneas obtidas de um sensor de ponto de anel de cavidade e sistema LIDAR em intervalos de 30 s fornecem precisões de 0,7% e 1,2% e exatidões de 1% e 3% dos níveis ambientais de CO₂ e CH₄, respectivamente. As análises de desvio de Allan indicam melhorias de longo prazo na precisão de 0,4% para ambos os gases por um período de medição de ≈ 1000 s. Tais diferenças podem ser esperadas, uma vez que as recuperações do IPDA LIDAR relatam as médias regionais instantâneas dos níveis de CO₂ e CH₄ que se estendem pelo topo da camada limite ou outras camadas atmosféricas mal misturadas que são inacessíveis às técnicas de detecção pontual (WAGNER, 2016).

No Ano Polar Internacional de 2007–2008, o LIDAR de absorção diferencial forneceu um registro contínuo da distribuição vertical de ozônio acima do navio. Vários eventos de depleção total e parcial de ozônio foram observados durante março de 2008 (SEABROOK, 2011).

1.4.4 Espectrofotômetros terrestres

Os espectrofotômetros são instrumentos capazes de medir absorbância ou transmitância em função do comprimento de onda específico de um determinado composto químico. Ele é composto por uma fonte de radiação; um sistema óptico (monocromador, seletor de comprimento de onda de interesse); um recipiente para a amostra; um detector de radiação, convertendo energia

radiante para um sinal elétrico; e uma unidade de processamento e leitura de sinal (circuito eletrônico) (SKOOG et al., 2015).

No uso da espectrofotometria terrestre, o Espectrofotômetro Brewer é um instrumento instalado na superfície do solo, que efetua medidas da radiação solar, permitindo a dedução da coluna total dos seguintes gases atmosféricos: O_3 , SO_2 e NO_2 . Além disto, mede a radiação solar global na banda de ultravioleta do tipo B – UVB. Usando o Espectrofotômetro Brewer podem obter o perfil vertical de O_3 pela técnica de Umkehr e as quantidades de NO_2 estratosférico e troposférico pela técnica de crepúsculo, Twilight Zenith-Sky. (SCI-TEC, 1999).

1.4.5 Uso de drones para monitoramento atmosférico

Avanços recentes na tecnologia de transporte levaram ao desenvolvimento de veículos versáteis capazes de operar em ambientes terrestres, aquáticos e aéreos. Considerando a aplicação no campo da química, a combinação de drones com ferramentas de amostragem e sensores portáteis tem sido considerada uma estratégia poderosa (SILVA-NETO et. al., 2025).

Cada técnica fornece níveis diferentes de resolução espacial e temporal, permitindo caracterizar os gases poluentes em toda a troposfera. Por outro lado, esses métodos geralmente requerem operadores especializados e manutenção cara e não são simples de implantar, especialmente em países com baixo orçamento dedicado a pesquisa nesta área. Nesse contexto, sistemas leves de sensores portáteis acoplados a drones aéreos não tripulados surgiram como uma excelente alternativa para obtenção de informações móveis e verticais sobre a composição química, com vantagens de flexibilidade no acoplamento dos sensores, lançamento e pouso rápidos, baixo custo, capacidade de pousar

em pequenos espaços e a possibilidade de se manter em diferentes altitudes. Várias aplicações interessantes foram desenvolvidas a partir do uso de drones, incluindo sistemas de amostragem miniaturizados para material particulado e medições de perfil vertical de concentração de compostos gasosos usando sensores do tipo MOX portáteis (LI et al., 2020; VILLA et al., 2016; RUIZ-JIMENEZ et al., 2019).

Para selecionar o drone mais adequado, é crucial avaliar os objetivos principais da aplicação e dos dispositivos analíticos que serão usados para amostragem ou análise. Alguns parâmetros importantes devem ser considerados, como custo, tempo de voo, sistema de navegação e carga útil máxima (SILVA-NETO et. al., 2025).

O potencial dos drones aéreos para realizar operações analíticas é limitado pela autonomia de voo e pelo tamanho/massa dos instrumentos embarcados. O instrumento deve realizar os processos analíticos (por exemplo, amostragem e análise) dentro da vida útil da bateria, que pode variar de 10 min a algumas horas. Este fato explica o elevado número de estratégias de amostragem que vêm sendo desenvolvidas, nas quais o analito alvo é apenas amostrado no ar utilizando o drone e submetido à posterior análise. Além disso, as técnicas analíticas para determinação de compostos gasosos convencionais são volumosos e pesados, necessitando de fonte de alimentação de 110 ou 220 V para sua operação, inviabilizando assim a sua fixação em sistemas aéreos. Nesse cenário, sensores portáteis miniaturizados e de baixo custo surgem como uma alternativa promissora para atender aos requisitos de sensores embarcados para drones aéreos.

Segundo Moura (2024), o sensor MQ-135 é especializado na detecção de monóxido de carbono (CO) e, ao ser combinado com a versatilidade do Arduino® Mega e a mobilidade de um drone, é possível monitorar a qualidade do ar de forma abrangente e precisa, mesmo em áreas de difícil acesso. A análise da medição de CO em perfil vertical com o drone ressaltou novas perspectivas para o monitoramento ambiental em 3D. foram verificados que as concentrações de CO em 80 m de altitude variou 5,52 a 1,06 ppm. Essa abordagem inovadora permitiu a coleta de dados em diferentes altitudes, ao fornecer uma visão abrangente da distribuição de CO em áreas urbanas ou rurais.

1.5 Métodos analíticos para determinação de H₂S

Métodos analíticos para determinação de compostos reduzidos de enxofre, tais como o íon sulfeto em solução e o H₂S em fase gasosa, têm sido desenvolvidos nas últimas décadas utilizando técnicas analíticas instrumentais diversas, tais como espectrofotometria de absorção molecular no UV-VIS (SILVA et al., 2011), espectrometria de fluorescência (CRUZ, 2008) e potenciometria (SILVA, 2018).

O método do azul de metileno é o método padrão para determinação de sulfeto aquoso e H₂S gasoso e se baseia na formação do corante azul de metileno a partir da reação com N,N-dimetilfenileno-1,4-diamina e sulfeto na presença de íon férrico utilizando a técnica de espectrofotometria de absorção molecular na região do UV/Vis cuja absorção máxima ocorre a 670 nm (SILVA et al., 2011). Um outro método digno de consideração é conhecido há mais tempo usando espectrofotometria de absorção molecular e é baseado na formação de um produto vermelho-violeta (nitroprussiato), obtido da reação do sulfeto com

nitrosilpentacianoferrato (II), com absorção máxima em 538 e 326 nm. Neste método é importantíssimo a necessidade de um controle rígido do pH do meio variando 10 a 12,5, visto que a velocidade da reação de formação do complexo colorido e a sensibilidade do método diminuem bastante em valores de pH menores que 10; em valores de pH maiores que 12,5 o reagente se decompõe, diminuindo a quantidade do produto obtido (KUBAN, 1992).

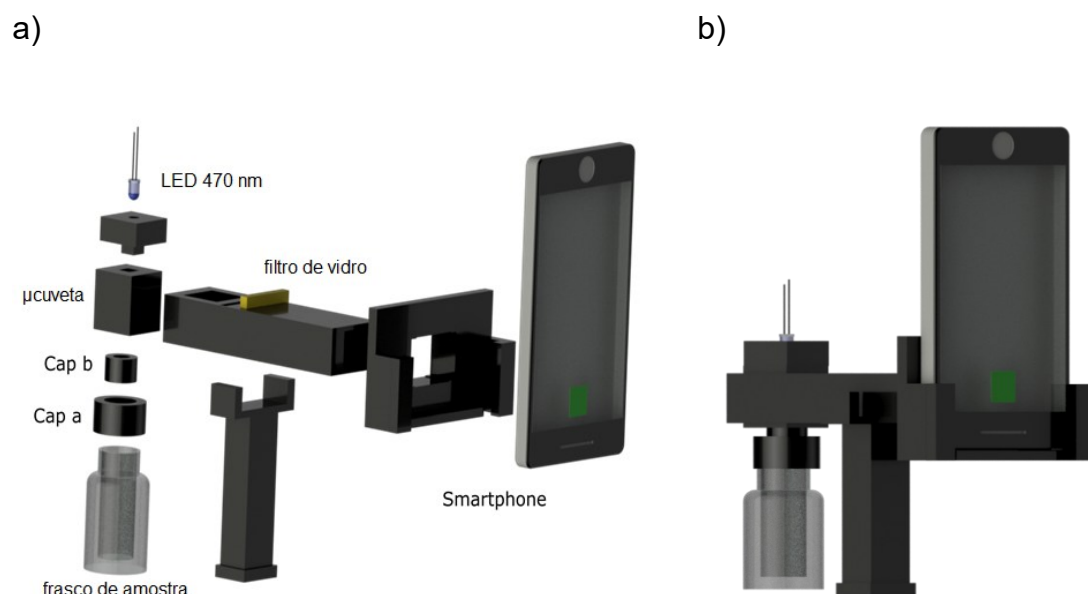
A espectroscopia de fluorescência tem sido frequentemente empregada como uma técnica analítica, devido à sensibilidade do sinal óptico. No caso do H_2S , vários complexos luminescentes baseados em metais têm sido usados como sondas de reconhecimento e determinação de sulfeto. Agentes complexantes de mercúrio, como Acetato de Fluoresceína de Mercúrio (AFM), têm sido amplamente empregados principalmente para determinação de sulfidrila (TODA et. al., 2001). A detecção de sulfeto de hidrogênio pode ser realizada utilizando compostos de paládio formados por ligantes luminescentes (PETRUCI, 2013; PETRUCI, 2015). Outro método bastante interessante e aplicado é o baseado na reação seletiva do H_2S com AFM em meio alcalino, provocando a supressão (*quenching*) da fluorescência em 535 nm quando excitada em 475 nm. (CRUZ, 2008).

Essa reação também pode ser usada para determinar sulfeto de hidrogênio gasoso utilizando uma gota suspensa do reagente. Neste arranjo, uma solução alcalina de acetato de fluoresceína de mercúrio II forma uma pequena gota na ponta de um tubo de Teflon para coletar e posteriormente determinar sulfeto de hidrogênio. Uma fibra ótica transporta a luz de excitação (λ_{max} 495 nm) proveniente de uma fonte, para o interior da gota da solução. Um fotodiodo com filtro seletivo permitindo a leitura da luz com λ_{max} 530 nm foi

colocado a 90 graus em relação ao tubo formador da gota. O arranjo em questão pode quantificar sulfeto de hidrogênio em concentrações entre 20 e 150 $\mu\text{g m}^{-3}$ no ar (cerca 15 até 100 ppb) com amostragens de 2 minutos e com tempo total de análise inferior a 5 minutos (CARDOSO, 1998).

Usando a mesma reação de H_2S com AFM na determinação do sulfeto em amostras de água. Nessa técnica, H_2S é gerado pela acidificação do meio contendo sulfeto seguido de difusão através de uma membrana de politetrafluoretileno (PTFE) e é coletado pelo reagente AFM, que reage seletivamente com compostos reduzidos de enxofre provocando supressão da fluorescência na região de emissão da cor verde. Uma plataforma foi projetada com um filtro de vidro amarelo do tipo passa-banda longa (515 nm) foi posicionado entre a microcubeta e o smartphone (fig. 5a) para bloquear a interferência da emissão do LED em 470 nm. A figura 5b apresenta a plataforma montada pronta para as análises. O software ImageJ foi utilizado para obter os valores individuais da intensidade da cor representada digitalmente pelo modelo RGB. O desempenho da plataforma para determinação de sulfeto foi um tempo de 20 min e uma resposta linear na faixa de 0,5 a 5,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (LEAL, 2020).

Figura 5. plataforma de determinação de sulfeto (a) componentes e (b) montados e prontos para uso (LEAL, 2020).



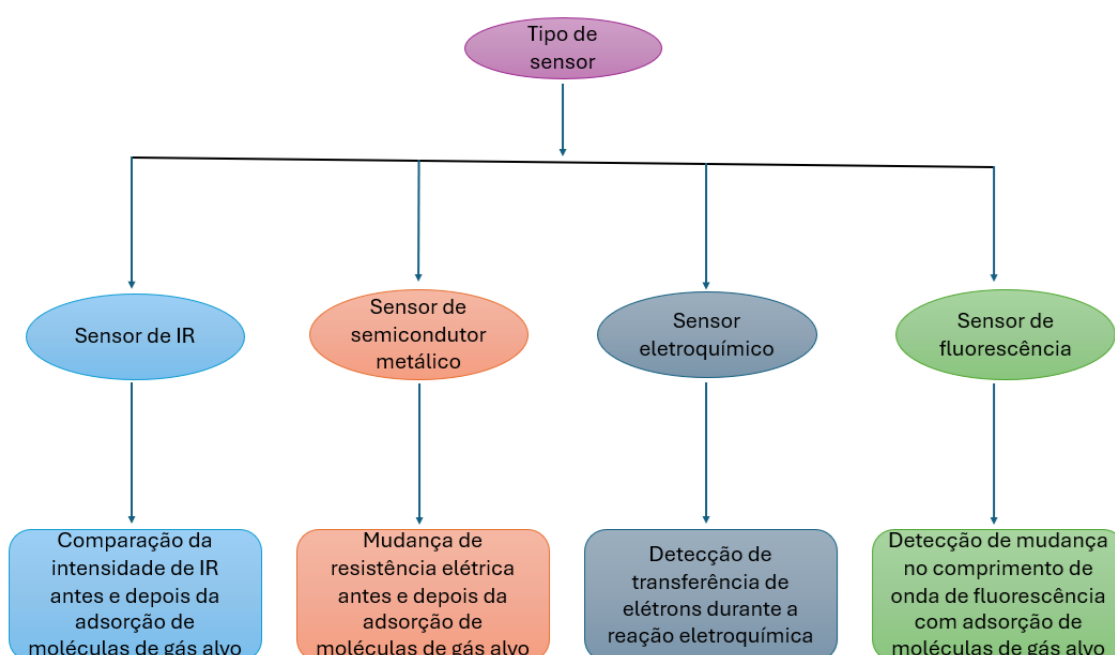
A detecção eletroquímica é uma outra estratégia usada na determinação de sulfeto. Os métodos potenciométricos baseiam-se na medida de potencial de células eletroquímicas sem o consumo apreciável de corrente. Os potenciômetros são compostos com um eletrodo indicador e de referência. O eletrodo referência é uma meia célula com potencial conhecido, constante e independente da concentração de analito ou qualquer outro íon presente na solução enquanto o eletrodo indicador para análise de sulfeto é um fio de prata (Ag) recoberto com sulfeto de prata (Ag_2S) uma vez imerso em solução contendo concentração de sulfeto, desenvolve um potencial (VOGEL, 2008). A potenciometria pode ser aplicada em amostras gasosas ou líquidas. Ao ser borbulhado H_2S em solução de pH alcalino, libera-se íon sulfeto que podem ser quantificados potenciometricamente a partir de um elétrodo seletivo para íon. Os potenciais das amostras obtidos são comparados com uma curva analítica que relaciona a diferença de potencial observada ao logaritmo da concentração de

soluções padrão de concentração de sulfeto conhecida adicionados à amostra desconhecida (SILVA, 2018).

1.6 Sensores em química analítica

O princípio básico de operação dos sensores portáteis de gás depende do tipo de interação entre o analito na fase gasosa e o elemento sensor, que provocará o aparecimento de um sinal analítico pelo transdutor. Esses sensores podem ser utilizados para calibrar outros tipos de sensores e para quantificação de gases em misturas específicas (ZONTA et. al., 2023). A grandes variedades de tipos de sensores são classificados com base em seus mecanismos de interação: eletroquímico, ressonante, quimiorresistivo, capacitivo, catalítico e óptico (ZONTA et. al., 2023; DHALL et. al., 2021). A figura 6 apresenta um fluxograma com os tipos de sensores e seus respectivos princípios de funcionamento.

Figura 6. Tipos de Sensores e princípios de funcionamento (DHALL et. al., 2021)



A demanda por esses dispositivos para garantir a saúde e a segurança ocupacional está aumentando em vários setores. Os sensores para detecção de poluentes do ar devem ser estáveis em condições adversas. A esse respeito, a indústria e a comunidade científica têm trabalhado para desenvolver vários tipos de sensores, tendo em mente o rápido aumento da poluição ambiental. A comercialização desses sensores de gás se tornou uma área prioritária para a saúde humana (DHALL et. al., 2021).

Os sensores portáteis baseados em óxidos metálicos semicondutores (MOXs) têm sido empregados para monitoramento em tempo real de compostos gasosos poluentes, como por exemplo, CO₂, H₂S, O₃ e NO₂, e acoplados a drones para obtenção de informações da qualidade do ar (LIN et al., 2015; DUANGSUWAN, 2020). Os sensores MOX são acopláveis a microcontroladores, que permitem a transmissão e armazenamento dos dados gerados. Apesar de sua capacidade de fornecer respostas quase em tempo real, baixo custo, baixos requisitos de fonte de alimentação e baixo peso e tamanho, esses sensores geralmente têm limites de detecção da ordem de ppmv e sua aplicação em cenários do mundo real não é bem fundamentada devido à falta de validação e calibração em campo (PETRUCI et al., 2022). Além disso, os sensores baseados em MOX são altamente afetados por mudanças na umidade relativa (PIEDRAHITA et al., 2014; PETERSON et al., 2017). Por outro lado, sensores baseados em métodos químicos que utilizam a coleta (amostragem) do analito por meio de uma solução reagente renovável são considerados uma excelente alternativa para análise de gases (SOUSA et al., 2022; FILHO, 2019).

Sensores ópticos são dispositivos baseados em emissão e detecção de luz que são capazes de detectar e medir diversos parâmetros físicos, químicos

e biológicos (UDD, 2011). O princípio de funcionamento baseia-se na presença de um emissor que gera uma radiação eletromagnética e um receptor. O sinal de luz gerado pelo emissor do sensor óptico é modulado em um determinado comprimento de onda. O receptor do sinal é acoplado a um filtro que somente considera sinais com a mesma frequência do emissor (CAPELLI, 2013). Sensores ópticos detectam mudanças nas propriedades da radiação resultantes da interação das ondas eletromagnéticas e o analito. As moléculas do analito de interesse absorvem a energia da luz emitida em determinado comprimento de onda e geram vibração molecular. Essas moléculas podem absorver as ondas eletromagnéticas, e pode ser observada uma queda na potência de luz detectada pelo sensor (YOSHIMURA et al., 2014)

Os métodos químicos que resultam em um fenômeno óptico após a interação entre o reagente e o analito foram adaptados para construção de plataformas analíticas de diferentes configurações, resultando em instrumentos que fornecem baixos limites de detecção (ppbv), alta seletividade, facilidade de uso, baixo volume de reagente, tempos de resposta rápidos e custo reduzido (PETRUCI, 2013; ZHOU et al., 2015; PETRUCI, 2018). Além disso, devido à grande disponibilidade de componentes optoeletrônicos e com o advento da tecnologia de impressão 3D, a construção de plataformas pequenas, leves, baratas, versáteis, de baixo consumo de energia e dedicadas que podem ser conectadas com dispositivos de Internet das Coisas (IoT) para controlar, coletar e transmitir dados tem sido facilitado (CADEADO et al., 2022; MACHADO, 2021; CAPELLA, 2020).

Em pesquisa realizada por Souza (2022), para análise de O_3 e NO_2 , foi utilizada impressão 3D na construção da plataforma. Os dispositivos foram

conectados e controlados por duas placas Arduino Uno, analisando os dois gases simultaneamente. O dispositivo foi baseado no método colorimétrico de índigo e Griess–Saltzman para O_3 e NO_2 , respectivamente. A amostragem de ar foi realizada borbulhando ar em um frasco contendo 800 μL de cada reagente. Além disso, os sensores de luz (TSL2591) podem enviar continuamente os valores dos sinais para um aplicativo Android (Bluetooth Terminal HC-05) ou um laptop via Bluetooth. O método forneceu um limite de detecção de 5 e 1 ppbv para O_3 e NO_2 .

1.7 Espectroscopia

A espectroscopia é um ramo da ciência voltado para estudar o comportamento da matéria frente à sua interação com radiação eletromagnética (TIBOLA et. al., 2018). Uma característica importante das análises espectroscópicas é que cada átomo ou molécula possuirá a capacidade de absorver e/ou emitir – a depender do tipo da técnica – frequências características da radiação eletromagnética (GEORGE, 1987). Entre as várias regiões espectrais da radiação eletromagnética que são utilizadas nas técnicas espectrométricas, destacam-se as regiões ultravioleta (UV), visível (Vis) e infravermelha (IR). A espectrofotometria UV/Vis é baseada em medições da absorção de radiação eletromagnética nas regiões ultravioleta e visível do espectro, nas quais a quantidade de radiação transmitida ou absorvida é medida. A absorção da radiação visível e ultravioleta depende principalmente do número e arranjo de elétrons e seus níveis de energia nas moléculas ou íons absorventes. A absorção pode ser correlacionada com o tipo de ligação que existe nos compostos químicos em estudo (SANTOS, et. al., 2023).

A espectrofotometria de absorção no UV e visível (UV-vis) tem sido aplicada de inúmeras maneiras em análises qualitativas e quantitativas. As aplicações analíticas envolvem desde matrizes ambientais, estabilidade de compostos, cinética e equilíbrio de reações, assim como na identificação de espécies metálicas. A diversidade de compostos e materiais que podem ser avaliados pela espectroscopia UV-Vis explica a heterogeneidade de áreas em que esta pode ser aplicada como, por exemplo, nas pesquisas dissolução de ingredientes farmacêuticos, de alimentos, de qualidade das águas, de esgotos, e ambiental, entre outros (EDWARDS, 2017).

O uso de radiação eletromagnética em técnicas espectroscópicas tem promovido um avanço incrível no entendimento da estrutura da matéria. Essas técnicas analisam a radiação que é absorvida, emitida ou espalhada pelo analito. Os dados obtidos são fornecidos por aparelhos chamados espectrômetros, por sendo essa uma técnica extremamente sensível, mesmo em amostras com baixas concentrações (MOURÃO et. al., 2024). É possível inferir sobre a concentração de um composto químico utilizando a espectrofotometria na região do UV-Vis, usando uma curva analítica pela calibração univariada ou pela previsão após construção de um modelo por calibração multivariada (SANTOS et. al., 2022).

1.7.1 Espectroscopia de fluorescência molecular

A luminescência é a emissão espontânea de radiação eletromagnética resultante de transições eletrônicas em átomos ou moléculas. De forma mais específica, esse fenômeno ocorre quando um estado eletrônico é excitado por uma fonte externa de energia e, posteriormente, a energia absorvida é liberada na forma

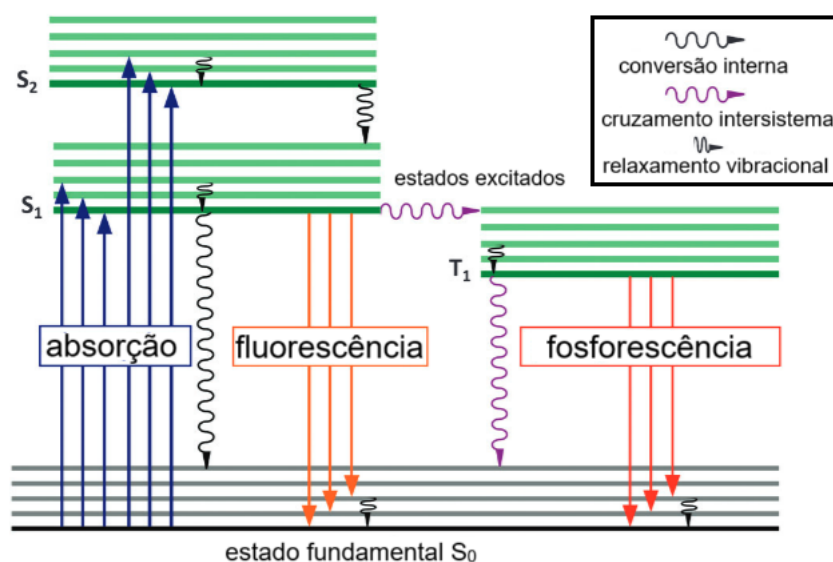
de luz. Quando a excitação ocorre por radiação eletromagnética, o fenômeno é denominado fotoluminescência, que se baseia na absorção de fótons, promovendo elétrons de valência para orbitais mais energéticos, seguida pela emissão de fótons durante o retorno desses elétrons ao estado fundamental. A fotoluminescência é formalmente dividida em dois tipos: fluorescência, cuja emissão ocorre em escalas de tempo muito curtas (na ordem de nanossegundos), e fosforescência, que envolve estados excitados de maior duração, podendo persistir por milissegundos ou mais. (LAKOWICZ, 2006).

Em geral, a distinção pode ser feita entre dois fenômenos principais de luminescência: fluorescência e fosforescência. Enquanto a fluorescência descreve a reemissão direta de luz absorvida, a fosforescência abrange a emissão retardada, incluindo processos como cruzamento intersistema. Os estados excitados envolvidos são descritos na (Fig. 7). O clássico diagrama de Jablonski, embora facilmente distinguíveis a diferenciação definitiva entre fluorescência e fosforescência requer medições de tempo de vida da luminescência (HEINE, 2013)

A energia térmica em temperatura ambiente não é suficiente para povoar significativamente os estados eletrônicos excitados, pois a diferença de energia entre os estados S_0 (fundamental) e S_1 (excitado) é muito maior do que a energia térmica disponível. Dessa forma, usa-se radiação para a indução da fluorescência, sendo que após a absorção de luz, vários processos podem ocorrer. Um fluoróforo é geralmente excitado para algum nível vibracional mais alto de S_1 ou S_2 , ocorrendo interações entre esses dois estados eletrônicos. É chamado de conversão interna quando o elétron decai de S_2 para S_1 em um processo não radiativo. Dessa forma, a emissão de fluorescência resulta de um

estado excitado S_1 termicamente equilibrado, ou seja, do estado vibracional de menor energia, portanto, o surgimento da fluorescência é acompanhado do decaimento dos processos de conversão interna e relaxamento vibracional, e isso indica que, a fluorescência independe da energia de excitação. No estado S_1 , as moléculas também podem sofrer uma conversão de spin para o primeiro estado tripleto T_1 , processo conhecido como cruzamento intersistema formando a fosforescência (MOURÃO et. al., 2024).

Figura 7. Diagrama de Jablonski (Heine, 2013)



A espectroscopia de fluorescência é uma técnica largamente empregada para estudar a interação de biomacromoléculas e pequenas moléculas de ligantes, por ter precisão e facilidade de manuseio (MANOUCHEHRI et al., 2016; XU et al., 2019). Essa técnica se destaca no cenário por várias razões. Ela é uma técnica analítica extremamente sensível e tem sido amplamente utilizada na resolução de problemas que requerem baixos limites de detecção. A sensibilidade é consideravelmente maior em comparação às outras, como por

exemplo, a espectrofotometria UV/Visível. O limite de detecção de espectroscopia de fluorescência é da ordem de ng mL^{-1} , devido a sua alta sensibilidade e alta relação sinal-ruído (MOURÃO et. al., 2024).

A espectroscopia de fluorescência ou espectrofluorimetria é uma técnica complementar à absorção. Envolve os mesmos orbitais mencionados, mas é subsequente de um estado excitado que emite um fóton de energia mais baixa em relação ao absorvido (SOARES, 2021). A principal causa do efeito é a perda de energia por relaxamento dos elétrons excitados para o menor nível de energia vibracional do estado excitado (JAMESON, 2014). O deslocamento dos comprimentos de onda entre absorção e emissão faz com que seja possível o uso de filtros óticos precisos, capazes de bloquear a luz de excitação da fonte emissora, e assim o sinal de emissão pode ser observado em um sistema de baixo ruído (RANZAN, 2021).

O tempo de vida da fluorescência e o rendimento quântico são talvez as características mais importantes de um fluoróforo. O rendimento quântico é o número de fótons emitidos em relação ao número de fótons absorvidos. O tempo de vida também é importante, pois o tempo de vida determina o tempo disponível para o fluoróforo interagir ou difundir-se em seu ambiente e, portanto, as informações disponíveis de sua emissão (MONICA, 2021).

O processo de supressão da fluorescência, ou *quenching*, se refere a qualquer processo gerado por um agente externo que reduza a intensidade da fluorescência. O quenching pode ocorrer através de diferentes mecanismos como rearranjos moleculares, transferência de energia ou formação de complexos não fluorescentes, dividido em dois tipos básicos de mecanismos de interação estáticos ou dinâmicos (colisional). Ambos os tipos de interações

requerem contato molecular entre o fluoróforo e o extintor. A extinção estática ocorre no estado fundamental e um complexo não fluorescente é formado entre o fluoróforo e o extintor. No caso de extinção colisional, o extintor deve se difundir para o fluoróforo durante a vida útil do estado excitado. Como resultado do contato com o extintor, o fluoróforo retorna ao estado fundamental sem emitir um fóton. Em ambos os casos, isso leva a uma diminuição na intensidade geral medida do sinal de fluorescência, mas apenas o mecanismo dinâmico reduz a vida útil excitada (LICHOTA, 2022).

Vale ressaltar que análise por fluorescência dificilmente pode ser resultado da absorção de fótons na região do ultravioleta com comprimentos de onda menores que 250 nm, nesse comprimento de onda a radiação é muito energética, podendo causar desativação dos estados excitados pela pré-dissociação ou dissociação das moléculas fluorescente. Um comprimento de onda em 200 nm corresponde cerca de $585,76 \text{ kJ mol}^{-1}$. Grande parte das moléculas orgânicas tem pelo menos algumas ligações que podem ser rompidas perdendo assim a fluorescência (HOLLER, 2009).

As análises com uso da fluorescência tendem a desenvolver um sistema de sensores para detectar substâncias químicas, mantendo todos os benefícios que os instrumentos de bancada oferecendo componentes alternativos mais compactos (Denizon, 2023). Em geral, esses sistemas são compostos por três módulos essenciais: fonte de luz de excitação (com emissão monocromática), câmara de amostragem e um detetor da radiação emitida por fluorescência. Outros componentes adicionais normalmente utilizados são: um filtro óptico, para separar a luz de excitação da luz emitida por fluorescência, e fibras óticas, para guiar a luz até a amostra e da amostra até o detector (CAPITÁN-VALLVEY,

2011). A seleção do comprimento de onda de excitação e de emissão pode ser feita usando dispositivos óticos mais compactos como os filtros dicróicos, filtros passa banda ou filtros de cores em vez do uso de monocromadores. Estas fontes de luz de excitação podem ser substituídas por fontes mais compactas e com menor consumo energético, como os díodos emissores de luz, (LEDs) ou os díodos laser, que são dispositivos mais compactos, mais baratos e com comprimentos de onda específicos (Denizon, 2023).

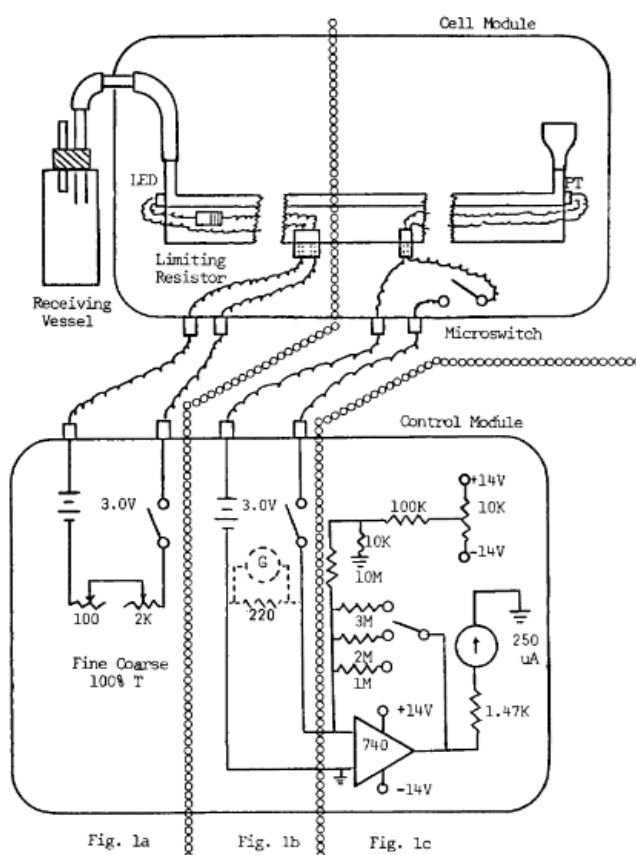
1.8 Uso de LEDs em química analítica (medidas de absorbância e fluorescência)

Um LED (light-emitting diode) é um dispositivo semicondutor eletroluminescente que emite radiação ao conduzir corrente elétrica. A eletroluminescência em material semicondutor começou a ser estudada no século XX. Em 1907, o norte-americano Henry Joseph Round, ao usar carbeto de silício (SiC), conseguiu produzir o fenômeno da eletroluminescência, sendo o primeiro a produzir um LED. Em 1923, o russo O. W. Lossey relatou eletroluminescência em cristais de carbeto de silício. Em 1962 Hall e colaboradores desenvolveram o primeiro LED usando material semicondutor arseneto de gálio (GaAs) com emissão em 840 nm na região do infravermelho. No mesmo ano o primeiro diodo emissor de luz (LED) baseado nos elementos GaAsP foi desenvolvido por Holonyak e Bevacqua e emitiam radiação 710nm (SCHUBERT, 2023).

Os LEDs foram introduzidos como uma fonte de radiação em fotometria na década de setenta. Flaschka (1973) foi o primeiro a propor um fotômetro de absorção molecular empregando LED (fig. 8) com emissão na região do visível

em um comprimento de onda em 670 nm. O LED foi acoplado diretamente no fotômetro e na extremidade oposta foi colocado um fototransistor para detecção da radiação transmitida pela amostra.

Figura 8. Esquema do primeiro fotômetro de absorção com uso de LED (FLASCHKA 1973)



Desde então, o uso de LED em configuração fotométrica nos sensores ópticos portáteis aumentou devido ao fato de se tratar de componentes de baixo custo, simples e com dimensões reduzidas. Os LEDs emitem radiação em uma estreita faixa de comprimento de onda, sendo possível encontrá-los em diferentes cores, desde o violeta até o infravermelho próximo (DIAS et. al., 2014). O uso de LEDs em fotômetros tem como princípio a interação da radiação

eletromagnética com a matéria (absorção) (SILVA, 2015). O emprego de LED como fonte de radiação dispensa a utilização de lâmpadas incandescentes (tungstênio) e dispositivos ópticos, lentes, filtros e prismas. Quando o LED é usado como fonte de radiação para detecção fotométrica, é obrigatório que o espectro de emissão do LED apresente uma ampla sobreposição com o espectro de absorção do composto a ser monitorado (DIAS et. al., 2014).

Para selecionar um LED com determinado comprimento de onda de emissão, é necessário observar em qual faixa o composto de interesse absorve radiação eletromagnética. Caso seja necessário um comprimento de onda diferente, o LED deverá ser substituído. Os fotômetros projetados têm a facilidade de troca do LED, tornando vantajoso por ser de baixo custo, baixo consumo de energia, estabilidade do feixe de emissão e tendo em média 100.000 horas de vida útil (SILVA, 2015). Os LEDs têm sua maioria o espectro de emissão no visível com bandas menores que 20 nm, possibilitando a construção de fotômetro para análises de absorção molecular na região UV-Vis (BUI, 2017).

Foi construído um fotômetro multicanal utilizando um conjunto de oito LEDs como fontes de radiação, com comprimentos de onda de 470, 500, 525, 562, 590, 612, 636 e 654 nm. A radiação emitida pelos LEDs é direcionada à amostra por meio de uma fibra óptica. Esse arranjo sequencial de LEDs permite a aplicação do fotômetro na análise de diferentes compostos. Uns dos testes realizados simultaneamente pela plataforma foi a determinação de Cu (II) e Zn (II) em ligas metálicas e amostras de fármacos. Os resultados obtidos no estudo na determinação simultânea de metais em soluções aquosa indicaram erro aceitável na química analítica (FONSECA, 2004).

Uma plataforma portátil foi desenvolvida para a determinação *in situ* de sulfeto de hidrogênio. O sistema consistia em um LED com emissão de radiação em 470 nm e um espectrômetro USB de microfibra óptica. A detecção de sulfeto de hidrogênio foi baseada na extinção de fluorescência. O AFM foi impregnado em um dispositivo analítico de papel (μ PAD). A resposta analítica (α) foi a diferença entre as intensidades de fluorescência do branco (I_0) e da amostra (I), em um comprimento de onda de emissão de 525 nm. A vazão de amostragem foi de 500 mL min⁻¹ e o tempo de amostragem foi de 1 min. Uma relação linear foi obtida para concentrações de sulfeto de hidrogênio entre 17 e 67 ppb. O sensor foi capaz de detectar 3 ppb de H₂S, com um tempo de resposta de 60 s (PETRUCI, 2016).

Foi desenvolvido um sistema portátil para determinar cafeína em uma bebida energética e medicamentos, usando uma impressora 3D para análise de reações de decaimento de fluorescência em volumes de amostra reduzidos. Foi usada como fonte de radiação um LED de luz azul. O LED foi conectado a um sistema de microcontrolador Arduino nano (Atmega 328). Um resistor ajustável (potenciômetro) de 100 k Ω que divide a voltagem do sistema para controlar a intensidade de radiação do LED. Um smartphone foi utilizado para captura de imagem. O processamento obteve pelo software ImageJ para obter valores de canais RGB. O método desenvolvido apresentou uma faixa linear de 100 a 600 mg L⁻¹ de cafeína e limites de quantificação (LOQ) e detecção (LOD) de 100 mg L⁻¹ e 30,0 mg L⁻¹, respectivamente (LUCHIARI et. al., 2019).

Segundo Leal (2021), os LEDs que emitem na região azul (430 - 480 nm) fornecem alta intensidade de luz, devido ao alto brilho característico desses dispositivos. Esse fato pode ser vantajoso em métodos baseados no fenômeno

da fluorescência. Outro aspecto importante na utilização de LED como fonte de radiação para fins analíticos é a estabilidade da emissão de luz, para garantir a reprodutibilidade das medidas realizadas foi utilizado uma corrente de 20 mA para alimentação do LED. Nas condições do trabalho proposto a variação da corrente de 1 mA a mais ou a menos não tem resultado significativo no sinal analítico. A tabela 2 apresenta alguns trabalhos que utiliza LED como fonte de radiação.

Tabela 2. Pesquisa realizada usando LED com fonte de radiação

Comprimento de onda do LED (nm)	Tipo de espectroscopia	Espécie analisada	ref
365, 395, 412, 470 e 530	Fluorescência	Riboflavin	KHOSH MARAM, 2021
525	Absorbância	As(III)	SALIMI, 2022
590	Absorbância	Oxalato	MACHADO, 2021
235	Absorbância	Nitrato, nitrito, nitrogénio total dissolvido	LI et. al., 2023
360, 380, 430	Fluorescência	Clorofila	POWER et. al., 2023
590	Absorbância	O ₃	SOUSA et. al., 2022
525	Absorbância	NO ₂	SOUSA et. al., 2022

Os LEDs como fonte de radiação têm se mostrado eficientes em várias aplicações analíticas como mostra a literatura, substituindo as fontes

tradicionais, como as lâmpadas de deutério e halógenas de tungstênio. Esses LEDs são capazes de emitir radiação em comprimentos de onda de máxima absorção de muitos compostos, sendo ideais para espectrometria de absorção e fluorescência em plataformas com o uso IoT, capazes de automatizar os LEDs via Arduino.

1.9 Uso plataforma automatizada com sensor de luz na química analítica.

1.9.1 Arduino na automatização

O Arduíno foi criado na Itália e apresentado pela primeira vez em 2005, tendo como principal objetivo oferecer as plataformas de prototipagem eletrônica de baixo custo e de fácil manuseio por qualquer pessoa interessada (iniciante e avançada) em criar projetos com objetos e ambientes interativos visando automatizar. Arduíno é um microcontrolador de placa única projetado para tornar o processo de uso de eletrônicos em vários projetos acadêmicos, tecnológicos, científicos e artísticos (GEDDES, 2017).

Arduíno é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software em um ambiente de programação simples e claro. É fácil de usar para iniciantes, mas flexível o suficiente para que usuários avançados também aproveitem. A linguagem pode ser expandida por meio de bibliotecas C++ para realizar diversas funções. A plataforma é amplamente utilizada em projetos de automação devido à sua capacidade de integrar diferentes sensores e atuadores de maneira eficiente e econômica. As placas Arduíno são capazes de ler entradas – intensidade de luz incidente em um sensor, um dedo em um botão - e transformá-las em uma saída - ativando um motor ou ligando um LED (ARDUÍNO, 2024).

Os microcontroladores têm seu uso cada vez mais frequente em plataformas e protótipos automatizados no desenvolvimento de dispositivos portáteis para análises químicas. As placas de microcontroladores possuem chip com capacidade de diversos controles e automação nas plataformas de análise na química analítica sendo eles: um microprocessador, circuitos de entrada e saída (I/O), memória RAM ou ROM um gerador de relógio e um circuito integrado para suporte, tornando um sistema completo para aplicações e automação evitando mão de obra especializada na produção de equipamento de controle. Esses microcontroladores têm a facilidade de comunicar com sensores LEDs e motores tornando uma plataforma portátil e automatizada (OLIVEIRA, 2022).

Em um trabalho realizado utilizando Arduíno como placa microcontrolador em análise química volumétrica foi a aplicação em uma titulação ácido-base. Um sensor de obstáculo atua em conjunto com um sensor de luminosidade, enviando um sinal analógico que indica o ponto de viragem, o qual será processado pelo sistema para gerar um sinal digital que aciona o servo-motor para o fechamento da bureta. A placa Arduino, além de fornecer energia para o sistema (5V), recebe o sinal analógico do sensor de obstáculo e emite um sinal digital para o servo-motor. Dessa forma, o servo-motor realiza um giro de 90 graus para fechar a válvula da bureta e registrar o volume do titulante utilizado. Os testes realizados confirmaram a eficácia do sistema automatizado, com os resultados de titulação apresentando uma precisão comparável à obtenção manual dos dados. O desvio padrão observado, inferior a 0,26%, evidenciou a alta exatidão do sistema, destacando a capacidade do microcontrolador em manter consistência nas medições (KAMIJÓ, 2024).

Automação do Sistema de Injeção Sequencial (SIA) para determinação de vanádio em água por Espectrofotometria UV/Vis, realizada com plataforma livre, proporcionou versatilidade e baixo custo de implementação. Para o direcionamento e seleção das soluções através do sistema foi utilizada uma válvula seletora de baixa pressão de 10 porta. O Arduíno Mega 2560 responsável pelo acionamento da bomba de pistão e das válvulas seletoras de 6 vias e 10 portas. O limite de detecção (LD) e quantificação (LQ), calculado a partir do desvio padrão do branco ($n = 26$), de $15,0 \mu\text{g L}^{-1}$ e $36,0 \mu\text{g L}^{-1}$, respectivamente. Nas condições otimizadas a faixa de recuperação ficou entre 94,5 e 109,1%, mostrando o potencial do sistema como ferramenta de análise de rotina na determinação de vanádio em água (OLIVEIRA, 2016).

1.9.2 Sistema de sensor de luz

Um sensor químico é um dispositivo que transforma informações químicas, variando da concentração de um componente específico da amostra à análise da composição total, em um sinal analiticamente útil. Essas informações químicas podem se originar de uma reação química do analito ou de uma propriedade física do sistema investigado (HULANICKI, 1991).

A parte do receptor dos sensores químicos pode ser baseada em vários princípios: Físico/direto, onde nenhuma reação química ocorre. Exemplos típicos são aqueles baseados na medição direta de absorbância, índice de refração, condutividade, temperatura ou mudança de massa. Bioquímico, no qual um processo bioquímico é a fonte do sinal analítico. Exemplos típicos são sensores potenciométricos microbianos ou imunossensores. Esses sensores

são chamados de biossensores. Químico/indireto, no qual uma reação química com participação do analito dá origem ao sinal analítico (HULANICKI, 1991).

Para Janata (2009), os sensores químicos podem ser classificados de acordo com princípio de operação do transdutor e do tipo de analito que está sendo analisado. Os quatro mais importantes são: quimimecânicos, térmicos, eletroquímicos e ópticos. Os dispositivos ópticos transformam mudanças de fenômenos ópticos, que são o resultado de uma interação do analito com a parte receptora. Segundo Hulanicki (1991), este grupo pode ser subdividido de acordo com o tipo de propriedades ópticas que foram aplicadas em sensores químicos:

a) absorvância, medida em um meio transparente, causada pela absorvância do próprio analito ou por uma reação com algum indicador adequado.

b) a refletância é medida em meios não transparentes, geralmente usando um indicador imobilizado.

c) luminescência, com base na medição da intensidade da luz emitida por uma reação química no sistema receptor.

e) índice de refração, medido como o resultado de uma mudança na composição da solução. Isso pode incluir também um efeito de ressonância plasmônica de superfície.

f) efeito optotérmico, com base na medição do efeito térmico causado pela absorção de luz.

g) espalhamento de luz, com base nos efeitos causados por partículas de tamanho definido presentes na amostra.

d) fluorescência, medida como o efeito de emissão positiva causado pela irradiação. Além disso, a extinção seletiva da fluorescência pode ser a base de tais dispositivos.

Medidas de luminosidade são importantes em estudos envolvendo emissão ou absorção de radiação luminosa, por exemplo, em avaliações de eficiência de fontes luminosas, luminosidade de ambientes e investigações que envolvem interação da radiação com a matéria. Nessa linha de aplicações, este trabalho descreve o projeto e construção de um medidor de luminosidade que inclui a possibilidade de aquisição automática de dados, podendo ser aplicado em atividades práticas experimentais no ensino de ciências, tais como investigações sobre atenuação da radiação em função da distância, absorção de radiação luminosa por solutos em soluções, e avaliação de lâmpadas quanto a variação de sua intensidade luminosa no tempo. Esses sensores na maioria dos casos são fabricados com componentes eletrônicos e módulos de baixo custo, porém possuem elevado valor agregado para uso em plataformas microcontroladas de código aberto (GUADAGNINI, 2019).

O sensor TSL2591 é conectado e operado diretamente com microcontrolador, permitindo ajustar alguns parâmetros de medições, como o ganho e o tempo de integração. Essas configurações propuseram tornar o sensor mais ou menos sensível à luz incidente. O ganho pode ser ajustado para um dos seguintes valores: 1x, 25x, 428x e 9876x. A radiação emitida pelo LED foi direcionada diretamente para o sensor. Apenas dois valores de ganho foram avaliados, 1x e 25x, porque em valores maiores foi observada saturação do sinal. Melhores resultados foram obtidos para valor de ganho 1x e tempo de integração de 100 ms. Os sinais de intensidade diminuem com o aumento do tempo de integração até 300 ms. abordagem foi desenvolvida para determinação de oxalato explorando o conceito de IoT e determinação fotométrica. O desempenho analítico obtido pelo uso deste sensor, associado a um LED como

fonte de luz, foi semelhante ao obtido com um espectrofotômetro convencional (MACHADO, 2021).

Avaliação da resposta espectral e desempenho dos sensores de luz utilizando o modulo LDR, e os sensores TSL2591, LTR303 e LTR329, na construção do fotômetro. A escolha dos sensores foi considerada critérios técnico-analíticos, levando em consideração não apenas as especificações técnicas intrínsecas, mas também fatores práticos, como disponibilidade comercial, facilidade de integração com microcontroladores. Para avaliar a capacidade analítica de cada sensor, foram obtidas curvas de calibração para soluções coloridas que absorvem em diferentes regiões do espectro eletromagnético, como a tartrazina ($\lambda_{\text{máx}} = 430 \text{ nm}$), permanganato de potássio ($\lambda_{\text{máx}} = 545 \text{ nm}$) e azul de metileno ($\lambda_{\text{máx}} = 665 \text{ nm}$). Ao comparar as sensibilidades dos sensores para os diferentes analitos, observou-se que, em geral, apresentaram valores bastante similares ao obtido pelo espectrofotômetro, indicando consistência em seus desempenhos, mostrando potencial em ser implementados como detectores para medidas espectrofotométricas (JESUS, 2024).

Foi desenvolvida uma plataforma para análise simultânea de ozônio (O_3) e dióxido de nitrogênio (NO_2). Inicialmente, a relação de absorbância foi medida utilizando um dispositivo de detecção com LEDs emissores em 590 nm, para o monitoramento de O_3 , e 525 nm, para o monitoramento de NO_2 . A detecção da radiação transmitida foi realizada com o sensor digital de luz TSL2591. Na análise de ozônio utilizou sulfonato de índigo tris (SIT), provou ser um excelente reagente para determinação seletiva de O_3 . Para a análise de NO_2 foi empregado a reação de Griess-Saltzman. O método SIT para determinação de ozônio é

baseado na diminuição da absorbância. Enquanto o método NO_2 é baseado no aumento da absorbância após o tempo de amostragem. O sensor de luz TSL2591 fornece saída de intensidade luminosa como LUX. A razão logarítmica da intensidade luminosa medida de uma solução em branco e da solução índigo foi considerada como a absorbância. A Relação linear entre o sinal analítico e as concentrações foram encontradas para o O_3 e NO_2 na faixa de 40 a 130 ppbv e 3 a 200 ppbv respectivamente e com um limite de detecção de 5 ppbv e 1 ppbv. A plataforma foi empregada para monitorar a concentração horária de poluentes na atmosfera (SOUSA, 2022). Esses sensores têm um grande uso em pesquisa com plataforma miniaturizada e impressa em filamentos (impressão 3D). A tabela 3 apresenta alguns trabalhos que utiliza sensores de luz.

Tabela 3. Pesquisa realizada usando sensores de luz para análise química

Sensor	Espécie analisada	Linearidade	LOD	Ref.
TSL2591	nanopartículas de óxido de ferro	16 a 125 $\mu\text{g mL}^{-1}$	2 $\mu\text{g mL}^{-1}$.	SCHOLTZ, 2023
TSL251	Nitrito	0,5 - 12 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0,018 $\mu\text{mol L}^{-1}$ ¹	DONG et. al., 2019
TCS230	Pb(II)	0,6 a 10,0 mmol L^{-1} ¹	0,89 mmol L^{-1}	MORAIS et. al., 2015
TSL257	Cu(II)	1,0 a 12,0 mg L^{-1}	0,2 mg L^{-1}	SOARES et. al., 20118

TSL235R	glucose	0 a 300 mg dL ⁻¹	13.5 mg dL ⁻¹	CHAIANANTA KUL et. al., 2018
LDR	Ag(I)	0,5 a 6 µg mL ⁻¹	0.25 µg mL ⁻¹	SAADATI, 2023
	Al(III)	0.1–100 µg L ⁻¹	-	AMELIN et. al., 2011
S9706	Be(II)	0.01–100 µg L ⁻¹	-	
	Ga(III)	0.1–100 µg L ⁻¹	-	
AS 7341	glicerol	0,5 a 40,0 mg L ⁻¹	0,050 mg L ⁻¹	CADEADO, 2023

1.10 Impressão 3D em análise química

A impressão 3D, às vezes conhecida como manufatura aditiva, ganhou a atenção de químicos analíticos devido à sua simplicidade e capacidade de produzir rapidamente dispositivos analíticos a baixo custo. Impressoras 3D do tipo FDM estão sendo usadas atualmente por químicos analíticos para fabricar dispositivos microfluídicos, eletrodos, colunas cromatográficas a baixo custo com alta precisão e peças associadas a medições de laboratório. A grande variedade de impressoras 3D e materiais permite que os pesquisadores escolham um equilíbrio ideal entre custo e resolução de impressão, mas a tecnologia ainda precisa de mais melhorias na resolução espacial e diversidade de material de impressão, principalmente na nanoescala, como 2PP, ainda estão fora do alcance dos laboratórios universitários devido ao seu custo muito alto. Enquanto isso os químicos estão explorando ativamente esquemas simples para adaptar dispositivos impressos em 3D à análise química. As limitações claramente não são obstáculos para rápido desenvolvimento (AGRAWAAL, 2021).

A utilização da impressão 3D em pesquisas em escala de laboratório cresce em um ritmo acelerado permitindo a produção de protótipos em uma etapa de maneira reproduzível, especialmente nas ciências químicas na miniaturização. Na química analítica, os cientistas têm explorado a impressoras. O espectro de aplicações tem se expandido amplamente, tornando popular o objeto final impresso em 3D (PALENZUELA, 2018). Os custos e o tempo de fabricação são reduzidos, tornando a impressão 3D indispensáveis para os pesquisadores. Em química analítica tem uma ampla gama de aplicações, tais como fabricação de suportes e dispositivos microfluidicos, sensores eletroquímicos e para materiais de catálise. as vantagens da impressão 3D, permiti criar equipamentos personalizados para análise, com capacidade de reutilização e facilidade de integração em componentes comercialmente disponíveis (LED, sensores de luz etc.) (CARDOSO *et al.*, 2020).

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma plataforma integrando sensores acessíveis, transmissão de dados e análise computacional para determinação de sulfeto de hidrogênio na atmosfera.

2.2 Objetos específicos

- Projetar e implementar um sistema embarcado adaptado a veículos aéreos (ex: drones), garantindo leveza, eficiência energética e baixo custo.
- Acoplar a plataforma a drone, como prova de conceito, aplicar e validar em ambientes reais para determinação de H_2S por meio de medições verticais.
- Equipar a plataforma analítica com sensores de temperatura e umidade para monitorar as condições climáticas durante a análise e um módulo Bluetooth para transmitir os dados gerados para um smartphone em tempo real.

3 Materiais e Métodos

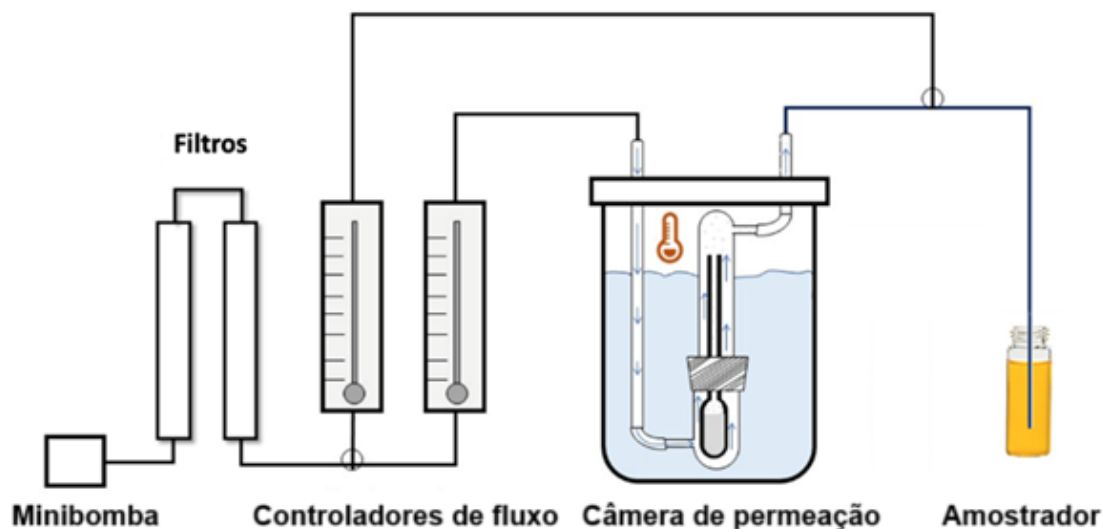
3.1 Reagentes e soluções padrão gasosas

O acetato de fluoresceína de mercúrio (AFM) e o hidróxido de sódio foram obtidos da Sigma-Aldrich (Alemanha) e da Qhemis (São Paulo, Brasil), respectivamente. A solução estoque de AFM foi preparada com concentração de 10^{-4} mol L⁻¹ em 0,1 mol L⁻¹ de NaOH e armazenada em frasco âmbar a 4 °C. Essa solução pode ser armazenada por um período de quatro semanas sem degradação significativa (KARUSH, 1964). A solução de trabalho com concentração de 10 µmol L⁻¹ foi preparada diluindo a solução estoque em 0,1 mol L⁻¹ de NaOH.

Padrões gasosos de H₂S para fins de calibração e validação foram preparados utilizando o método de permeação. Um tubo de permeação de H₂S (TP) com uma taxa de permeação certificada de 45,83 ng min⁻¹ ± 20% (VICI Metronics, Santa Clara, EUA) foi posicionado dentro de uma câmara de permeação (CP) a uma temperatura constante de 30 ± 0,1 °C. O ar purificado foi obtido pela passagem por duas colunas sequenciais (20 x 400 mm) contendo sílica gel e KI. Controladores de vazão (rotâmetros) foram usados para fornecer diferentes concentrações de sulfeto de hidrogênio variando o fluxo de ar através da CP e para controlar o fluxo de amostragem. O cálculo da concentração em ppb foi com base na equação 1, onde: TP é a taxa de permeação, Vm é o volume molar, MM massa molar e F o fluxo. A figura 9 apresenta um esquema do sistema de geração de padrão gasoso utilizado,

$$C = \frac{TP \times \frac{Vm}{MM}}{F} \times 1000 \quad \text{Equação 1}$$

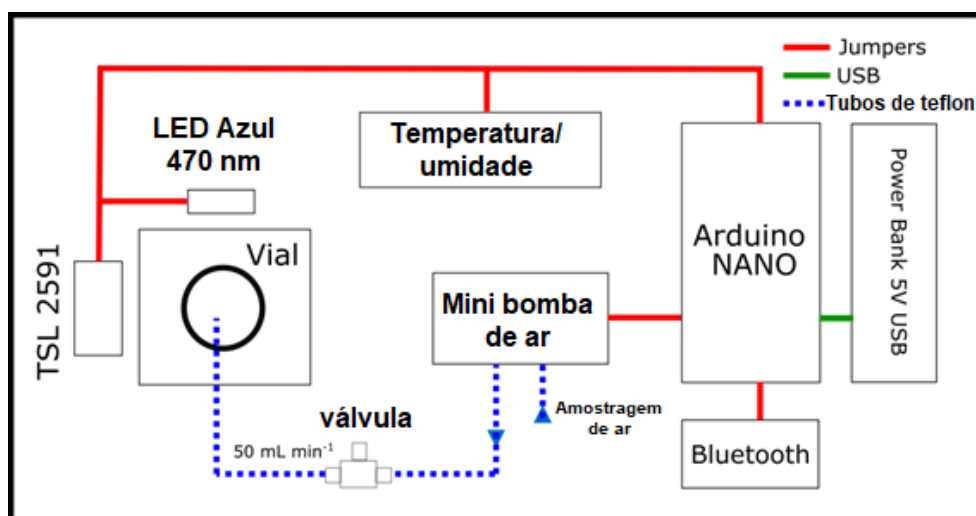
Figura 9. Esquema do sistema de geração de padrão gasoso



3.2 Montagem da plataforma analítica

A plataforma analítica foi projetada com o auxílio de um software CAD (Autodesk Inventor) e fabricada com filamento PLA ($\varnothing = 1,75$ mm) utilizando uma impressora 3D (modelo A2 Core, GTMax, Brasil). A plataforma contém dois blocos retangulares com dimensões de 120 x 120 x 20 mm e 120 x 120 x 60 mm para os blocos superior e inferior, respectivamente. A parte superior é composta por um suporte para o sistema de detecção, tubos, uma válvula de fluxo, uma minibomba de 5V, um sensor digital de temperatura/umidade (AHT20, Adafruit, NY, EUA) e um módulo Bluetooth de 2,4 GHz (RS232, HC-05). Essa parte se encaixa na parte inferior, que acomoda uma placa de circuito impresso (PCB) contendo um circuito composto por um microcontrolador Arduino Nano (Arduino, Itália), uma bateria portátil recarregável de íons de lítio (5 V, 10000 mAh) e cabos. A Fig. 10 apresenta um diagrama da plataforma analítica proposta.

Figura 10. Diagrama esquemático da plataforma analítica para sensoriamento de H₂S

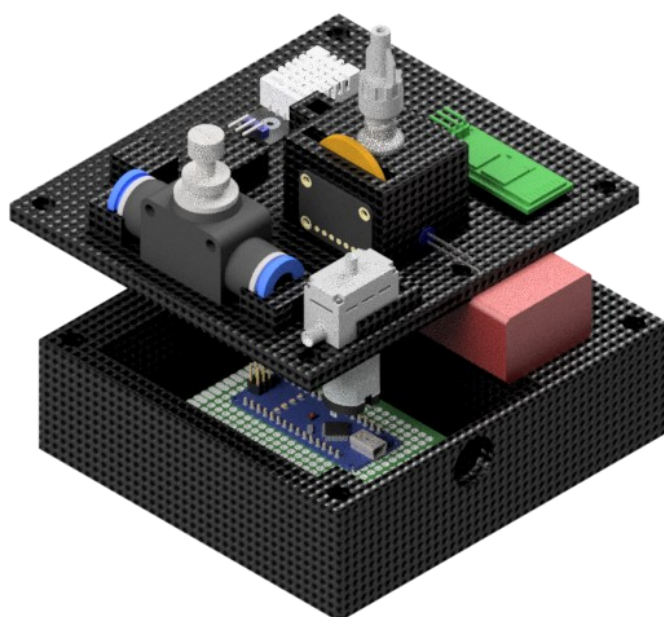


O suporte para o sistema de detecção consiste em um bloco retangular medindo 30 x 30 x 30 mm com um orifício cilíndrico de 12,5 mm de diâmetro e 25 mm de profundidade para colocar um frasco do tipo vial para HPLC (2 mL) contendo o reagente. Na parte frontal de um lado há um orifício com diâmetro de 5,5 mm para acomodar um LED (5 mm), enquanto um sensor de luz digital de altíssima sensibilidade que transforma a intensidade da luz em uma saída de sinal digital capaz de interface I2C direta (TSL2591, Adafruit, NY, EUA) está posicionado a 90° do LED. Neste sistema, um LED azul com emissão máxima centrada em 470 nm foi empregado para a excitação da AFM. O LED opera usando um circuito baseado em resistor ($R = 300 \text{ ohms}$) conectado ao Arduino, fornecendo uma corrente constante de 20 mA. Entre o frasco de reagente e o sensor de luz foi inserido um filtro óptico de corte em 510 nm, com a finalidade de eliminar a interferência da luz azul de excitação no sinal analítico. Uma minibomba de vácuo colocada na parte superior do bloco serve para borbulhar a amostra do gás na solução, uma válvula entre minibomba e o vial foi adicionada para controlar o fluxo. Foi adicionado na plataforma um sensor de temperatura e

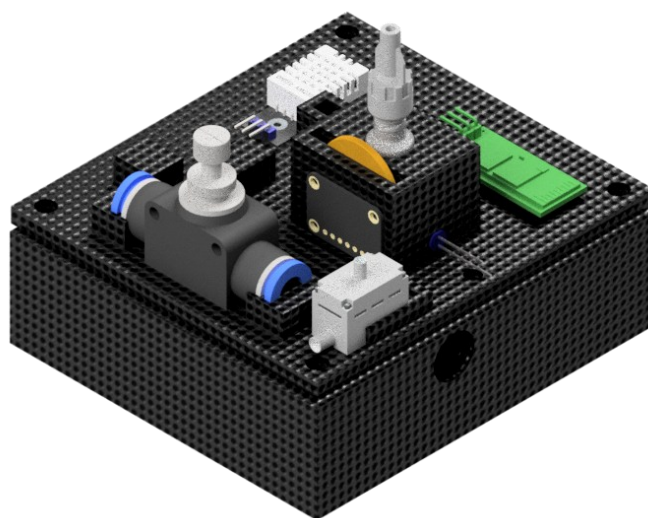
umidade para caracterizar os períodos de monitoramento do gás H_2S , todos os sensores foram programados pelo Arduino nano e enviando os dados por um módulo Bluetooth de 2,4 GHz. O modelo 3D da plataforma analítica é ilustrado nas Figuras 11a e 11b.

Figura 11. Modelo 3D da plataforma lab-on-a-drone para monitoramento da qualidade do ar. (A) desmontado; (B) montado.

A



B

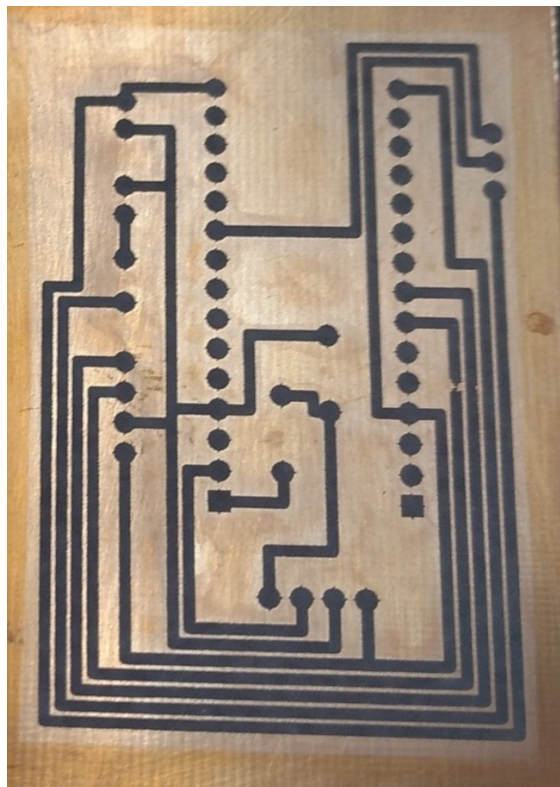


A corrente gerada pelo fotodiodo do sensor é convertida em sinal digital pelo circuito integrado analógico-digital (ADC). O TSL2591 é conectado e controlado pela placa Arduino Nano usando a biblioteca fornecida pelo fabricante. O sensor TSL2591 oferece recursos avançados de detecção de luz ambiente com uma ampla faixa dinâmica de 188 μ a 88.000 Lux. Pode ser interfaceado diretamente com microcontroladores, permitindo o ajuste de parâmetros como ganho (gain) (1x, 25x, 428x e 9876x) e tempo de integração (100-600 milissegundos). O sensor fornece medições precisas de iluminância e detecção separada de infravermelho e do espectro visível total. É altamente versátil, compatível com vários microcontroladores e possui baixo consumo de energia. As configurações operacionais do detector em condições otimizadas foram um tempo de integração de 200 ms e um ganho de 1x (baixo). Além disso, o sensor de luz digital envia continuamente valores de sinal para um aplicativo Android (Bluetooth Terminal HC-05, MightyIT, Reino Unido) ou um laptop via Bluetooth.

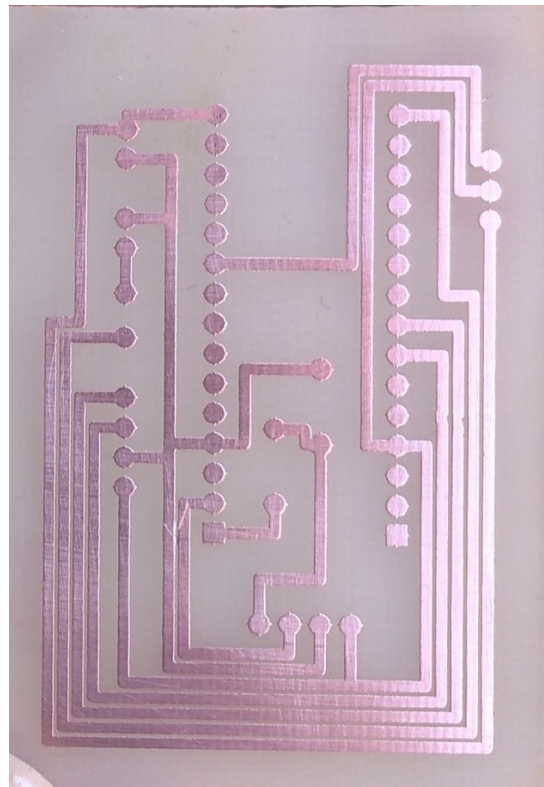
Placa de circuito impresso (PCB) foi projetada com o auxílio de um software CAD (Autodesk Fusion), e produzida em placa cobreada. O projeto foi impresso em papel fotográfico em seguida a impressão foi colocado sobre a placa cobreada e aquecido 160 °C por 20 minutos. Imediatamente ao retirar a placa com a impressão foi mergulhado em álcool a 92%, para retirar o papel fotográfico aderido a placa cobreada deixando a impressão na placa (Fig. 12a). Após a impressão na placa mergulhada em solução de perclórico de ferro 42% para oxidar todo cobre da área sem impressão (Fig. 12b), ficando somente as trilhas impressa.

Figura 12. Circuito impresso do sistema elétrico da plataforma (A) Placa cobreada com impressão (B) Placa com as trilhas após a oxidação do cobre.

A



B



3.3 Protocolo de montagem e análise de laboratório em um drone

A plataforma analítica descrita foi acoplada a um drone modelo Dji Phantom 4 Pro V2.0 na parte inferior por meio de presilhas plásticas e parafusos (Figura 2c). O drone era operado por um controle remoto. A autonomia de voo do drone com a plataforma analítica foi de 20 min. A Figura 13 apresenta a plataforma de monitoramento do ar “lab-on-a-drone” montada.

Figura 13. Modelo 3D da plataforma lab-on-a-drone configuração completa para monitoramento da qualidade do ar.



O protocolo de análise foi estabelecido da seguinte forma: 800 μL de uma solução de AFM com concentração de $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ foram transferidos para o frasco e inserido no sistema de detecção. Um tubo de Teflon com diâmetro de 2 mm foi colocado dentro do frasco e vedado com um conector de 3 vias para permitir o borbulhamento de ar no reagente. Em seguida, o LED azul foi ligado por 60 s e a intensidade da luz de emissão foi medida por 10 s, obtendo-se a média da intensidade inicial (I_1). Posteriormente, o drone foi posicionado na altitude alvo e a minibomba foi acionada, permitindo a amostragem do ar atmosférico a um fluxo constante de 50 mL min^{-1} por 10 min. Após o tempo de

amostragem, a minibomba foi desligada e a intensidade da luz emitida (I_F) foi calculada em média por 10 s com o LED azul ligado. Finalmente, a intensidade relativa da luz emitida (F_R) foi obtida pela seguinte equação:

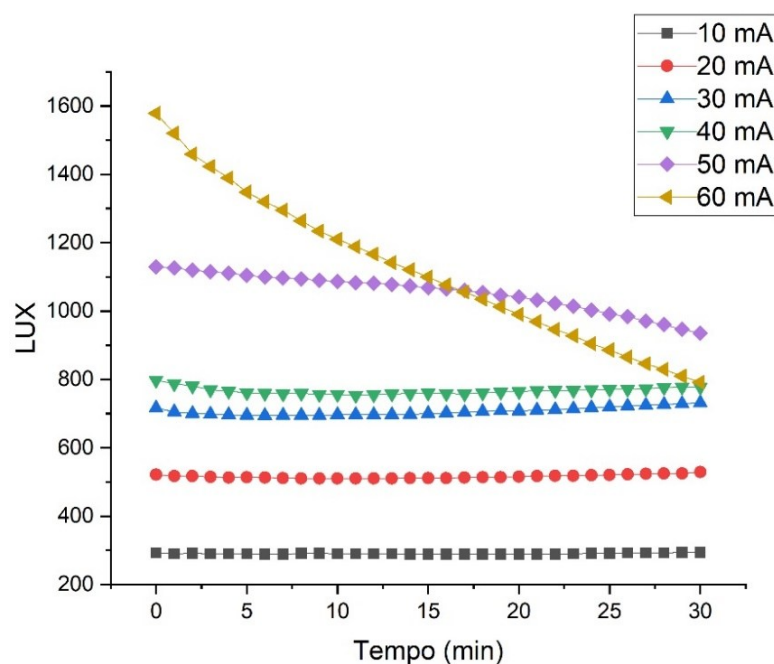
$$F_R = \frac{I_I - I_F}{I_I} \quad \text{Equação 2}$$

4 Resultados e discussão

4.1 Projeto da plataforma analítica: O sistema de detecção

O método de determinação utilizado baseou-se na reação seletiva entre H_2S e AFM que provoca a diminuição na intensidade de fluorescência em 535 nm (região de cor verde) quando excitada em 470 nm (região de cor azul). Essa reação é bastante descrita na literatura e foi aplicada para sensoriamento de H_2S utilizando diferentes arranjos instrumentais (TODA, 2011; CRUZ, 2008; LEAL, 2020). Para excitação do fluoróforo, intensidade alta de radiação neste comprimento de onda pode ser fornecida por LED azul de alto brilho, que podem ser vantajosos para medidas de fluorescência. Entretanto, corantes orgânicos, como a AFM, podem ser degradados pela irradiação em altas intensidades de luz de excitação, o que provoca a diminuição da intensidade de fluorescência ao longo do tempo de exposição. Este fato pode ser especialmente prejudicial para métodos baseados na supressão da emissão de fluorescência causada por uma reação química. Dessa forma, o efeito da exposição a radiação de excitação fornecida pelo LED azul na estabilidade da intensidade de fluorescência da AFM foi avaliado variando a corrente elétrica do LED e medindo a intensidade da fluorescência ao longo de 30 minutos consecutivos. Como pode ser visto na Figura 14, a estabilidade da emissão da AFM foi afetada quando correntes superiores a 50 mA foram usadas para operar o LED, comprovando a degradação do reagente quando exposto a altas intensidades de luz. Portanto, uma corrente de 20 mA foi selecionada para experimentos posteriores.

Figura 14. Avaliação da corrente no sinal analítico



A relação entre a intensidade de fluorescência medida pelo detector de luz digital (fornecida com unidades de LUX) e a concentração de AFM também foi analisada. As soluções de AFM foram preparadas com concentrações entre 0,1 e 1,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$, sendo que 800 μL de cada solução foram transferidos para o cubeta (frasco) e inseridos no sistema de detecção. Após as medições, foi construído um gráfico relacionando a intensidade de fluorescência (LUX) em função da concentração da AFM. Um coeficiente linear adequado ($R^2 > 0,99$) foi obtido na faixa estudada, indicando que o sistema de detecção construído pode ser utilizado para medir a intensidade de fluorescência do AFM. A Tabela 4 resume o desempenho analítico do sistema de detecção proposto.

Tabela 4. Parâmetros analíticos obtidos pelo sistema de detecção baseado em LED projetado usando AFM como um fluoróforo

Parâmetro	Valor
Faixa linear	0,1 – 1 $\mu\text{mol L}^{-1}$
Equação	IF (Lux) = 150,9 [AFM] + 222,7
R ²	0,991
Comprimento de onda emissão LED	470 nm
Volume AFM	800 μL

4.2 Otimização do método analítico para determinação de H₂S gasoso

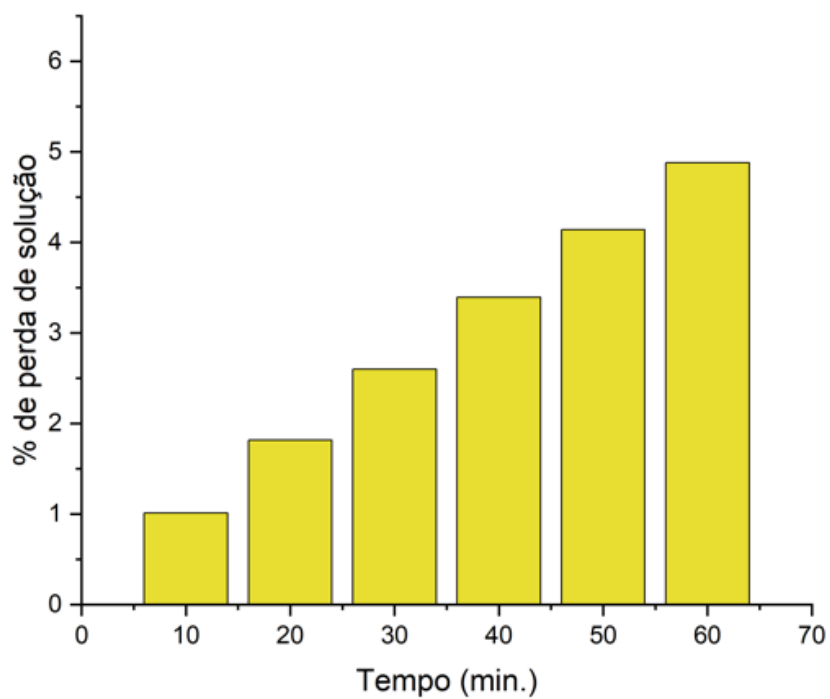
O procedimento analítico para quantificar o H₂S gasoso envolveu o borbulhamento de ar no frasco contendo 800 μL da solução AFM por um tempo de amostragem fixo e a leitura da intensidade de fluorescência resultante. Foi estabelecido um tempo máximo de amostragem de 20 minutos devido a autonomia de voo do drone. Maiores tempos de amostragem combinados com fluxos de amostragens mais altos de borbulhamento podem aumentar a detectabilidade do analito, porém também podem promover a evaporação do solvente, resultando em uma diminuição da sensibilidade e baixa reprodutibilidade, levando a erros analíticos. Por isso, a avaliação do tempo e fluxo de amostragem do analito em fase gasosa devem ser estudados.

Inicialmente, o seguinte procedimento foi usado para avaliar o efeito da evaporação do solvente durante o borbulhamento: o frasco foi preenchido com 800 μL da solução AFM com uma concentração de 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$, mantido a 30 °C e borbulhado com ar sem a presença de H₂S por 20 min com fluxo de ar variando de 20 a 80 mL min^{-1} (figura 15b). As massas do frasco antes e após o

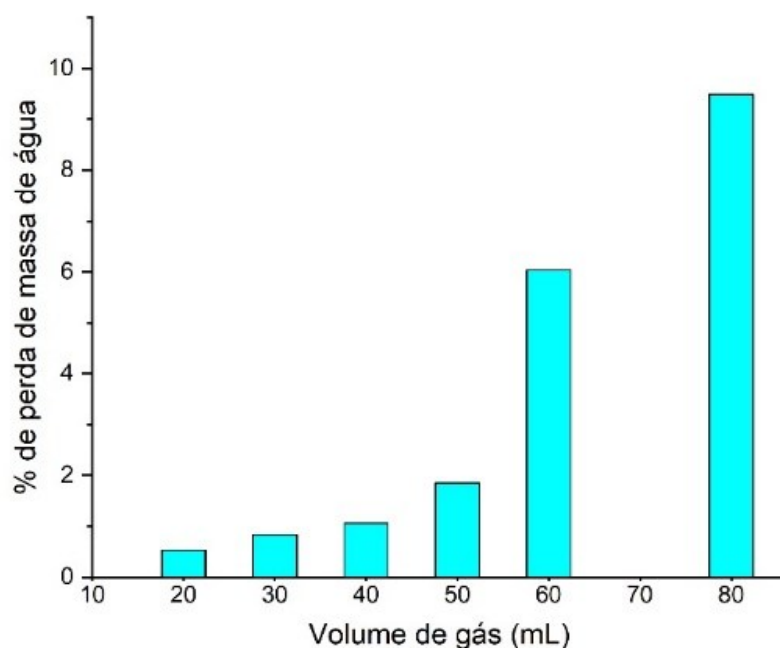
borbulhamento de ar foram pesadas em balança com sensibilidade de 0,1 mg. O volume evaporado foi calculado considerando a densidade da água de 0,997 kg m⁻³. Em um fluxo de ar de 50 mL min⁻¹ por 20 min, (figura 15a) a perda de volume representou 2% do volume inicial de 800 µL do reagente. Além disso, a intensidade de fluorescência da solução AFM foi medida por 20 min (cada 2,5 min) com borbulhamento de ar em um fluxo de 50 mL min⁻¹. Para esta condição estudada, o desvio padrão relativo (RSD) da intensidade de fluorescência da solução de AFM no período avaliado foi inferior a 2%, demonstrando que o borbulhamento de ar zero e a pequena perda de massa não afetou a intensidade de fluorescência do reagente. As figuras 15a e 15b mostram a variação da massa em função do tempo de amostragem e das vazões de ar.

Figura 15. Variação da massa com variação do tempo (A) e em função da vazão (B)

A)

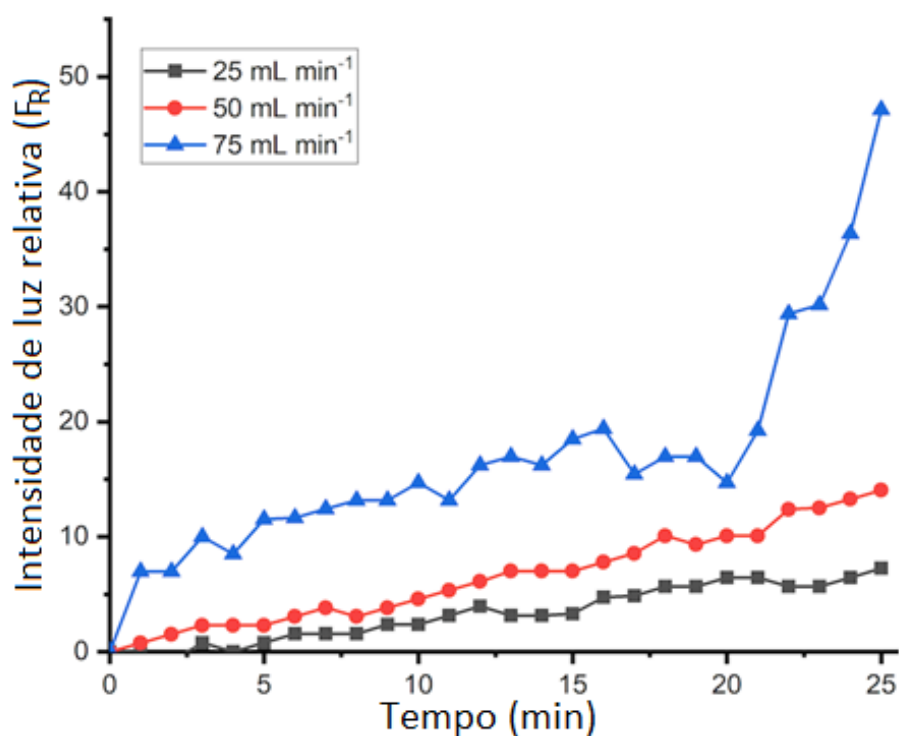


B)



Posteriormente, os parâmetros da reação entre H_2S gasoso e AFM usando a abordagem proposta foram otimizados. A eficiência da captura do analito pela solução reagente foi avaliada usando três fluxos de ar diferentes (25, 50 e 75 mL min^{-1}) durante 25 min. Foram utilizadas uma solução padrão gasosa de H_2S com concentração de 50 ppbv e uma solução de AFM com concentração de $10 \mu\text{mol L}^{-1}$. O sinal analítico foi calculado pela Equação 2. De acordo com a Figura 16, uma melhor eficiência de captura foi obtida com uma vazão de ar de 50 mL min^{-1} , sendo, portanto, selecionada como a vazão de ar de amostragem mais adequada. Embora o sinal analítico tenha aumentado com 75 mL min^{-1} , o borbulhamento de ar utilizando a montagem proposta resultou no transbordamento da solução.

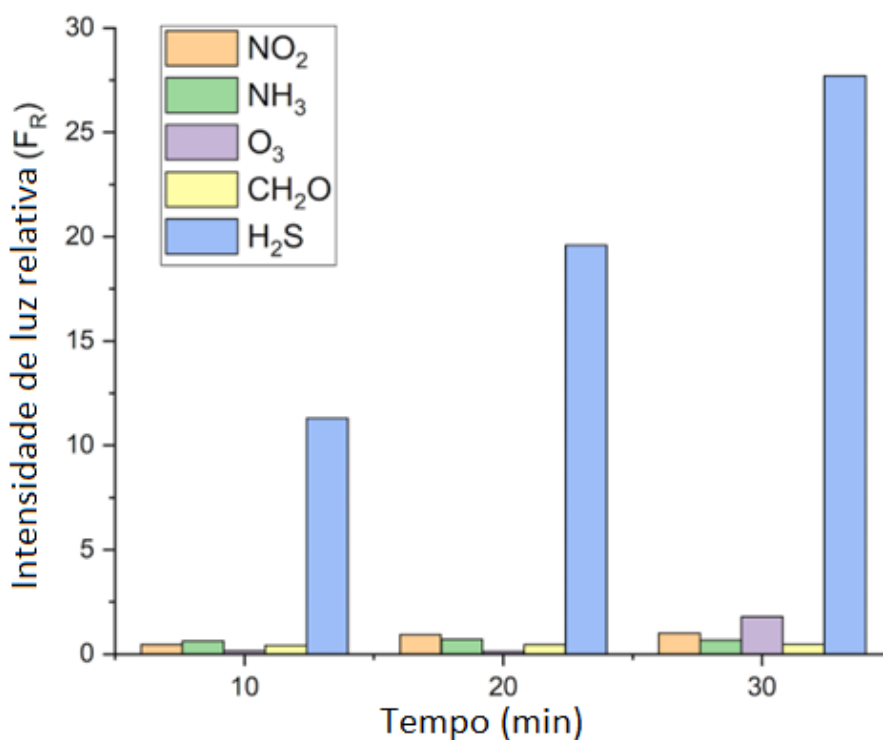
Figura 16. Variação do sinal analítico em função do tempo de amostragem usando diferentes fluxos de ar na amostragem



A seletividade do método analítico foi avaliada comparando o sinal analítico resultante da reação entre o AFM e outros poluentes comumente encontrados na atmosfera, como NO₂, NH₃, O₃ e CH₂O, com o sinal gerado pela reação com H₂S nas condições experimentais otimizadas. O sinal analítico foi medido após 10, 20 e 30 minutos de amostragem. As soluções padrão dos gases interferentes foram preparadas pelo método de permeação (NO₂, NH₃ e CH₂O) ou usando uma lâmpada UV (O₃). Todos os gases foram avaliados em concentrações superiores às normalmente encontradas em condições atmosféricas normais. A Figura 17 demonstra que apenas H₂S provocou diminuição significativa na intensidade de fluorescência da AFM, confirmando a

alta seletividade do reagente para H_2S , conforme relatado anteriormente na literatura (CARDOSO, 1997).

Figura 17. Sinal analítico medido a partir da interação entre AFM e outros poluentes atmosféricos. Condições experimentais: Fluxo de amostragem: 50 mL min⁻¹. Concentração dos gases: NO_2 : 255 ppbv, O_3 : 200 ppbv; NH_3 : 130 ppbv; CH_2O : 240 ppbv; H_2S : 100 ppbv.



Após os estudos realizados, a curva de calibração foi construída correlacionando o sinal analítico produzido após o procedimento de amostragem otimizado com diferentes concentrações de H_2S gasoso padrão, produzido pelo método de permeação. Um tempo de amostragem de 10 min foi definido com base na autonomia da bateria do drone e na obtenção de um bom sinal analítico. Além disso, um fluxo de amostragem de 50 mL min⁻¹ foi estabelecido como

condição ótima do sistema. Uma correlação linear foi encontrada entre a faixa de 15 a 197 ppbv de H₂S e um limite de detecção (LOD) de 9 ppbv foi calculado de acordo com a relação três vezes o sinal/ruído. A precisão obtida foi de 6% (RSD). Os parâmetros analíticos obtidos e as condições otimizadas estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros analíticos e condições otimizadas da plataforma analítica proposta para quantificação de H₂S

Parâmetro	Valor
Faixa linear	15 - 197 ppbv
Equação	$F_R = 0,282 [H_2S] - 4,796$
LOD	9 ppbv
Repetibilidade (50 ppbv, n=3)	6% (RSD)
SD branco (F/F0)	0,43
volume AFM	800 µL
Concentração da AFM	10 µmol L ⁻¹
Fluxo de ar de amostragem	50 mL min ⁻¹
Tempo de amostragem	10 min

4.3 Aplicação da plataforma analítica “lab-on-a-drone” para monitoramento de H₂S

A plataforma analítica desenvolvida foi empregada, como prova de conceito, para determinar a concentração de H₂S gasoso em condições reais. O local de amostragem foi próximo a uma lagoa de tratamento de esgoto localizado na cidade de Iturama, estado de Minas Gerais, Brasil (19°44'43.9"S e

50°12'05.2"W). As águas residuais geralmente contêm uma alta concentração de sulfato, que é convertido em H₂S pela atividade bacteriana. Portanto, o ar próximo de estações de tratamento de esgoto geralmente possui quantidades elevadas de H₂S. O ar atmosférico foi amostrado por 10 min nas altitudes de 0 (nível do solo), 10 e 20 m usando o sistema *lab-on-a-drone*. O procedimento de análise foi realizado conforme descrito na seção experimental. O sinal analítico gerado (em LUX) foi transferido para um smartphone via Bluetooth, em tempo real, utilizando o aplicativo Bluetooth Terminal HC-05. Os resultados são apresentados na Tabela 6. Conforme observado, a concentração de H₂S transmitida em tempo real variou de 20 a 83 ppbv. Para o nível do solo, há diferença estatística entre os resultados transmitidos às 7h e 12h (teste t; p = 0,05) e não apresentou diferença para amostragem às 12h e 19h (teste t; p = 0,05). Após a decolagem do lab-on-a-drone a ~ 10 m, observa-se uma diferença estatística entre a concentração de H₂S transmitida às 12h e às 19h (teste t; p = 0,05). Considerando-se a uma altitude de 20 m, os níveis encontrados de H₂S transmitidos às 12h e 19h não apresentaram diferenças estatísticas (teste t; p = 0,05). Conforme informado acima, há um aumento da concentração de H₂S ao longo do dia, uma provável hipótese para esse comportamento pode ser explicada pela alta incidência de luz solar no lago, que apresentou durante a amostragem valores de temperatura e umidade variando de 21 a 32 °C e 70 a 77%, respectivamente. Todas as concentrações encontradas de H₂S apresentaram níveis ambientais aceitáveis que podem variar de 20 a 100 ppb (recomendado pelo Scientific Advisory Board on Toxic Air Pollutants, EUA) (KAUR et al., 2008).

Tabela 6. Concentração encontrada resumida de H₂S em ppbv obtida pela plataforma lab-on-drone para um tempo de amostragem de 10 min em diferentes altitudes

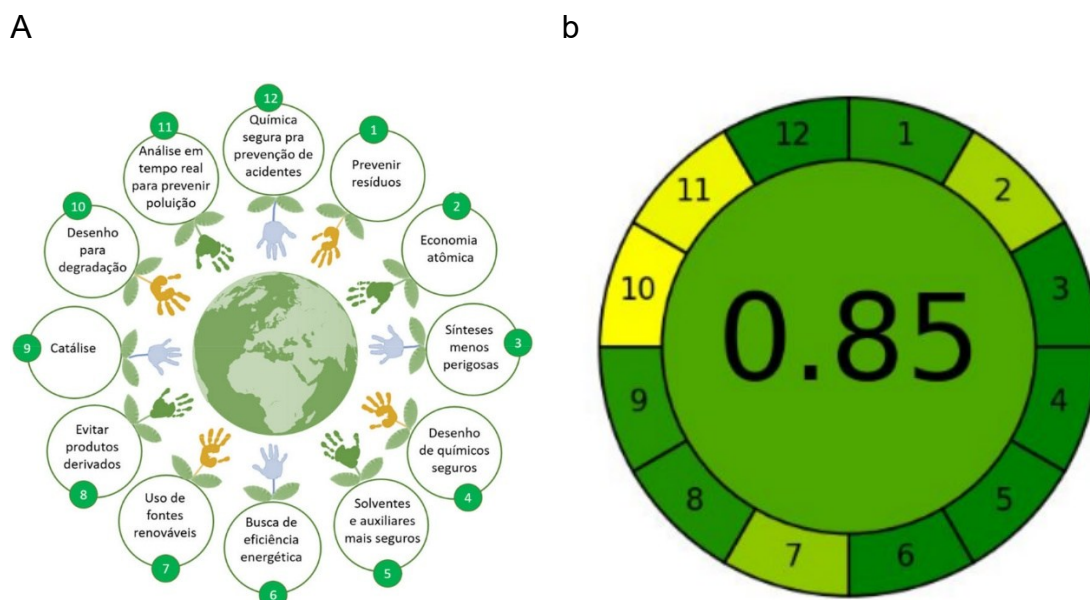
Tempo	Nível do solo	10 m	20 m
7:00 AM	20 ± 2	< LOD	< LOD
12:00 PM	42 ± 1	32 ± 3	79 ± 4
7:30 PM	44 ± 2	63 ± 2	83 ± 4

Conforme demonstrado, a utilização de drones como portadores de plataformas analíticas para realização de medições verticais é bastante promissora, devido ao perfil compacto, facilidade de operação e relativo baixo custo. O sistema de medição deve atender a alguns critérios, como baixo peso e estabilidade para realizar a análise. Devido a esta tarefa tão desafiadora, poucos estudos foram publicados na literatura, sendo que os publicados utilizam principalmente o drone para amostragem ou empregando sensores semicondutores, que são muito influenciados pela umidade, sofrem reatividade cruzada e precisam de alta temperatura para operar (CHEN et al., 2020; POCHWAŁA et al., 2020; LEE, 2022). Até onde sabemos, esta é a primeira demonstração de uma plataforma analítica óptica baseada em um método químico úmido seletivo embutido em um drone capaz de amostrar, medir, determinar e transmitir os dados gerados da concentração de um composto gasoso.

4.4 Avaliação da métrica verde do método apresentado.

Após demonstrar a viabilidade da instrumentação do sistema portátil proposto para amostragem e monitoramento de H_2S em tempo real em diferentes altitudes, também avaliamos o impacto ecológico do uso do seu laboratório em um drone. Por esse motivo, o software AGREE que pode medir o quão ecologicamente correto é o método proposto foi utilizado. Por meio dessa ferramenta é possível estimar uma métrica AGREE variando de 0 a 1 que é baseada nos 12 princípios da Química Analítica Verde. Na Figura 18, é possível ver uma pontuação de 0,85 que pode ser associada a uma abordagem de ecologicamente correta, conforme apresentado por Pena-Pereira (2020).

Figura 18. Os 12 princípios da química verde (A) Pontuação de greenness obtida com o software AGREE (B).



No princípio 1 a utilização de um volume reduzido de reagentes, na ordem de 800 microlitros, contribui diretamente para a minimização da geração de resíduos, atendendo ao princípio da prevenção. No princípio 4 o composto utilizado foi projetado de forma a ser altamente seletivo para a análise proposta,

cumprindo sua função com baixo impacto tóxico ao meio ambiente e à saúde humana. O princípio 6 o processo desenvolvido opera em temperatura e pressão ambiente, o que reduz significativamente o consumo energético, tornando o método mais sustentável e economicamente viável (figura 18a).

Os benefícios ecológicos do uso do laboratório em um drone incluem a ausência de pré-tratamento externo de amostra (princípios 1 e 4), análise in situ (princípio 3), método automático/miniaturizado (princípio 5), volume reduzido de amostra, baixa geração de resíduos, consumo mínimo de energia (princípios 2, 7 e 9, respectivamente) e segurança do operador (princípio 12). No entanto, os princípios 10 e 11 impactaram negativamente a eco escala devido à natureza dos reagentes explorados (FMA e NaOH).

5 Conclusão

Uma plataforma analítica IoT dedicada, de baixo custo, portátil e automatizada foi projetada para amostragem e determinação da quantidade de H_2S gasoso no ar atmosférico. O dispositivo leve foi acoplado a um drone – denominado de *lab-on-a-drone* – para permitir medições verticais da concentração de poluentes na atmosfera. O método analítico quantitativo foi baseado na reação química entre AFM e H_2S que leva a uma supressão da fluorescência em 535 nm quando excitada a 470 nm. Todos os componentes periféricos (por exemplo, mini-bomba, LED, sensor de luz e sensor de temperatura/umidade) foram controlados por um PCB baseado em Arduino nano. Os resultados gerados foram imediatamente transferidos para um smartphone via Bluetooth.

Dispositivos de qualidade do ar baseados em semicondutores de óxido metálico têm sido considerados a primeira opção para monitoramento de gases poluentes. Apesar do baixo custo, portabilidade e facilidade de operação, esses sensores sofrem muito com umidade e interferências de outras espécies, requerem alta temperatura para operar e demandam tempo prolongado para estabilização do sinal. Por outro lado, o método químico baseado na reação entre AFM e H_2S é reconhecidamente seletivo, e o procedimento de borbulhamento não é influenciado por variações de temperatura e umidade. Portanto, a plataforma analítica baseada no método químico apresentou um desempenho analítico aprimorado, além de um custo altamente vantajoso e pontuação ecologicamente correta aceitável. Finalmente, o dispositivo proposto pode ser adaptado a uma variedade de drones, permitindo medições verticais de poluentes. Essa versatilidade representa uma vantagem significativa, pois

simplifica o acesso a pontos de amostragem remotos e viabiliza o monitoramento da dinâmica das correntes de ar e do espalhamento de H_2S . Ao mudar o dispositivo de detecção e/ou reagente, outros poluentes atmosféricos importantes podem ser determinados.

Referência bibliográficas

AGRAWAAL, H.; THOMPSON, J. E. Additive manufacturing (3D printing) for analytical chemistry. *Talanta Open*. Volume 3, 100036, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talo.2021.100036>.

AMELIN, V. G.; ALESHIN, N. S.; ABRAMENKOVA, O. I.; NIKOLAEV, Y. N.; LOMONOSOV, I. A. Solid-phase fluorometric determination of Al(III), Be(II), and Ga(III) using dynamic preconcentration on reagent cellulose matrix. *Journal of Analytical Chemistry*, 66(8), 709–713, 2011. DOI: 10.1134/s1061934811080041.

ARDUÍNO. Uma introdução ao que é Arduíno e para que ele pode ser usado. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/whats-arduino/>>. Acesso em 20 de dezembro de 2024.

ASSIREU, A. T.; MENDONÇA, J. C.; FREITAS, R. M.; REIS, A. L.; PELLEGRINI, C. C.; PIMENTA, F. M. Uso de VANT para Prospeção Eólica em Sistemas Aquáticos: Desenho Amostral e Avanços Instrumentais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 34, n. 2, 237 - 245, 2019. DOI: 10.1590/0102-77863340037.

BRAUER, M.; FREEDMAN, G.; FROSTAD, J.; VAN DONKELAAR, A.; MARTIN, R. V.; DENTENER, F.; DINGENEN, R. VAN; ESTEP, K.; AMINI, H.; APTE, J. S.; BALAKRISHNAN, K.; BARREGARD, L.; BRODAY, D.; FEIGIN, V.; GHOSH, S.; HOPKE, P. K.; KNIBBS, L. D.; KOKUBO, Y.; LIU, Y.; MA, S.; MORAWSKA, L.; SANGRADOR, J. L. T.; SHADDICK, G.; ANDERSON, H. R.; VOS, T.; FOROUZANFAR, M. H.; BURNETT, R. T.; COHEN, A. Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013. *Environ. Sci. Technol.* 2015, 50 (1), 79–88. DOI: [10.1021/acs.est.5b03709](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03709).

BUI, D. A.; KRAICZEK, K. G. HAUSER, P. C. Molecular absorption measurements with an optical fibre coupled array of ultra-violet light-emitting diodes. *Anal. Chim. Acta*. 986, 95-100, 2017. DOI: 10.1016/j.aca.2017.07.007.

CADEADO, A. N. S.; SILVA, S. G. Development of a portable optical device with a multi-channel spectrometer sensor for quantification of glycerol in wine: a maker approach for on-site analysis. *Anal. Methods*, 15, 4477-4484, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3AY00972F>.

CADEADO, A.; MACHADO, C.; OLIVEIRA, G.; SILVA, D.; MUÑOZ, R.; SILVA, S. Internet of Things as a Tool for Sustainable Analytical Chemistry: A Review. *J. Braz. Chem. Soc.* 2022, 33 (7), 681–692. DOI: [10.21577/0103-5053.20220048](https://doi.org/10.21577/0103-5053.20220048).

CAPELLA, J. V.; BONASTRE, A.; CAMPELO, J. C.; Ors, R.; Peris, M. IoT & Environmental Analytical Chemistry: Towards a Profitable Symbiosis. *Trends Environ. Anal. Chem.* 2020, 27, 1–8. DOI: [10.1016/j.teac.2020.e00095](https://doi.org/10.1016/j.teac.2020.e00095).

CAPELLI, A. Automação Industrial - Controle do Movimento e Processos Contínuos. Rio de Janeiro: Editora Saraiva, 2013.

CAPITÁN-VALLVEY, L. F.; PALMA, A. J. Recent developments in handheld and portable optosensing - A review. *Analytica Chimica Acta*, 696, 27–46. (2011). DOI: 10.1016/j.aca.2011.04.005.

CARDOSO, A. A.; LIU, H.; DASGUPTA, P. K. Fluorometric Fiber Optic Drop Sensor for Atmospheric Hydrogen Sulfide. *Talanta* 1997, 44 (6), 1099–1106. DOI: 10.1016/S0039-9140(96)02202-3.

CARDOSO, A. A.; PEREIRA, E. A.; ROCHA, J. C; Gotas suspensas: uma proposta para amostragem e análise de gases traços da atmosfera, *Química Nova*, v.21, 217-20, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40421998000200019>.

CARDOSO, R. M.; KALINKE, C.; ROCHA, R. G.; SANTOS, P. L dos; ROCHA, D. P.; OLIVEIRA, P. R.; MUNOZ, R. A. A. Additive-manufactured (3D-printed) electrochemical sensors: A critical review. *Analytica Chimica Acta*, 1118, 73-91, 2020. DOI: 10.1016/j.aca.2020.03.028.

CETESB. Qualidade do ar no estado de São Paulo. Serie relatórios. 2023. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2024/08/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2023.pdf>>. Acesso em nov. de 2024

CHAIANANTAKUL, N.; WUTTHI, K.; KAMPUT, N.; PRAMANPOL, N.; JANPHUANG, P.; PUMMARA, W.; PHIMON, K.; PHATTHANAKUN, R. Development of mini-spectrophotometer for determination of plasma glucose. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 204, 670–676, 2018. DOI: 10.1016/j.saa.2018.06.107.

CHEN, Q.; LI, X. B.; SONG, R.; WANG, H. W.; LI, B.; HE, H. DI; PENG, Z. R. Development and Utilization of Hexacopter Unmanned Aerial Vehicle Platform to Characterize Vertical Distribution of Boundary Layer Ozone in Wintertime. *Atmos. Pollut. Res.* 2020, 11 (7), 1073–1083. DOI: 10.1016/j.apr.2020.04.002.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução n° 003, de 28 de junho de 1990.

CONTI, T. de. Avaliação do método do balanço da camada limite para a estimativa de fluxos turbulentos noturnos. 2006. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS. 2006.

CRUZ, L. P. S.; CAMPOS, V. P. Métodos de amostragem e análise para compostos reduzidos de enxofre atmosférico. *Química Nova*, 31(5), 1180-1189, 2008. DOI: 10.1590/S0100-40422008000500047.

DENIZON, D. F. Sensor ótico portátil para detecção de substâncias químicas. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade de Coimbra, Lisboa – Portugal. 2023.

DHALL, S., MEHTA, B. R., TYAGI, A. K., SOOD, K. A review on environmental gas sensors: Materials and technologies. *Sensors International*, 2, 100116. 2021. DOI: 10.1016/j.sintl.2021.100116.

DIAS, T. R.; BRASIL, M. A. S.; FERES, M. A.; REIS, B. F. A flow cell with a new design to improve the utilization of the radiation emitted by LED and employed as a radiation source for photometric detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 198, 448–454. 2014). DOI: 10.1016/j.snb.2014.03.018.

DONG, C.; LI, W.; WANG, Z.; ZENG, J.; LIANG, J. An automated flow-batch analyzer based on spectrophotometry for the determination of nitrite. *Optoelectronics Letters*, 15(5), 339–342, 2019. DOI: 10.1007/s11801-019-9007-3.

DUANGSUWAN, S.; JAMJAREEKULGARN, P. Development of Drone Real-time Air Pollution Monitoring for Mobile Smart Sensing in Areas with Poor Accessibility. *Sensors and Materials*, Vol. 32, No. 2, 511–520, 2020. <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2450>.

EDWARDS, A. A.; ALEXANDER, B. D. UV-Visible Absorption Spectroscopy, Organic Applications. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, 511–519. 2017. DOI: 10.1016/b978-0-12-803224-4.00013-3.

EPA, Environmental Protection Agency. Hydrogen Sulfide. Disponível em <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100B2YD.PDF?Dockey=9100B2YD.PDF>>. Acesso em dezembro de 2024.

FAN, G.; FU, Y.; HUO, J.; XIANG, Y.; ZHANG, T.; LIU, W.; NING, Z. Tropospheric ozone sensing with a differential absorption lidar based on a single CO₂ Raman cell, *Atmos. Meas. Tech.*, 18, 443–453, 2025 <https://doi.org/10.5194/amt-18-443-2025>.

FERREIRA, E. S.; OLIVEIRA, L.; OCHOA, E.; MILTÃO, M.; ANDRADE NETO, A. V.; ALVES, Á.; LEYVA-CRUZ, J. A. Introdução às espectroscopias de absorção e fluorescência: aplicações farmacêuticas. *Caderno de Física da UEFS*, v. 12, p. 41-55, 2014.

FILHO, J. P.; COSTA, M. A. M.; CARDOSO, A. A. A Micro-Impinger Sampling Device for Determination of Atmospheric Nitrogen Dioxide. *Aerosol Air Qual. Res.* 2019, 19 (11), 2597–2603. DOI: 10.4209/aaqr.2019.06.0318.

FLASCHKA, H.; MCKEITHAN, C.; BARNES, R. Light Emitting Diodes and Phototransistors in Photometric Modules. *Analytical Letters*, 6(7), 585–594, 1973. DOI: 10.1080/00032717308058708.

FONSECA, A. Desenvolvimento de um fotômetro multicanal baseado em um arranjo de diodos emissores de luz. 2004. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2004.

GEDDES, M. Manual de projetos do Arduino: 25 Projetos Práticos para começar. 1. ed. - São Paulo: Editora Novatec, 2017.

GEORGE, W. O.; McIntyre, P. S. Infrared Spectroscopy. David J. Mowthorpe. Chichester: John Wiley, 1987.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244. 2010. DOI: 10.4336/2010.pfb.30.63.231.

GUADAGNINI, P. H.; ROCHA, FÁBIO SARAIVA DA; BARLETTE, VANIA E. Um medidor de luminosidade com módulo sensor integrado e aquisição automática de dados com aplicações didáticas. REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA (ONLINE), v. 41, n. 3, 2019. DOI: 10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0294.

GUIDOTTI, T. L. Hydrogen Sulfide: Advances in Understanding Human Toxicity. Int. J. Toxicol. 2010, 29 (6), 569–581. DOI: [10.1177/1091581810384882](https://doi.org/10.1177/1091581810384882).

GUIMARAES JUNIOR, J. C.; VASCONCELOS, E. S.; SOUZA, A. S. de. SANTOS, J. D. F dos. FONSECA, E. J. F.; OLIVEIRA, M. A. de. BRAGA, C. M. M.; BRAGA, F. C. CICLOS BIOGEOQUÍMICOS. [S. I.]: Arco Editores, 2022. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.48209/978-65-5417-016-1>. Acesso em: 12 jan. 2025.

HEINE, J.; MÜLLER-BUSCHBAUM K. Engineering metal-based luminescence in coordination polymers and metal–organic frameworks. Chemical Society Reviews, 42, 9232, 2013 DOI: <https://doi.org/10.1039/C3CS60232J>.

HOLLER, F. J.; SKOOG, D. A.; CROUCH S. R. Princípios de Análise Instrumental. 6ª edição, Bookman, Porto Alegre, 2009.

HULANICKI, A.; GLAB, S.; INGMAN, F. Chemical sensors: definitions and classification. Pure and Applied Chemistry, v. 63, n. 9, p. 1247–1250, 1 jan. 1991. DOI: <http://dx.doi.org/10.1351/pac199163091247>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sensoriamento Remoto. Disponível em: <https://atlascolar.ibge.gov.br/cartografia/21735-sensoriamento-remoto.html>. Acesso em novembro de 2024.

JAMESON, D. M. Introduction to fluorescence. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.

JANATA, J. Principles of chemical sensors. 2. ed. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 2009. DOI: 10.1007/b136378.

JESUS, D. M. de. Avaliação de sensores ópticos de baixo custo para aplicação em determinações fotométricas ambientais empregando dispositivos IoT's

portáteis. 2024. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2024.

KAMIJÓ, E. N. S.; ROSSI, A. S. Projeto: uso de microcontrolador arduino para auxílio em titulações químicas. *Brazilian Journal of Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.10, n.11, p.01-19, 2024. DOI: 10.34117/bjdv10n11-008.

KAUR, M.; JAIN, N.; SHARMA, K.; BHATTACHARYA, S.; ROY, M.; TYAGI, A. K.; GUPTA, S. K.; YAKHMI, J. V. Room-Temperature H₂S Gas Sensing at Ppb Level by Single Crystal In₂O₃ Whiskers. *Sensors Actuators, B Chem.* **2008**, 133 (2), 456–461. DOI: 10.1016/j.snb.2008.03.003.

KHOSHMMARAM, L.; MOHAMMADI, M.; BABADI, N. A. A portable low-cost fluorimeter based on LEDs and a smart phone. *Microchemical Journal*, 171, 106773. 2021. DOI: 10.1016/j.microc.2021.106773.

KOMARNISKY, L. A.; CHRISTOPHERSON, R. J.; BASU, T. K.; Sulfur: its clinical and toxicologic aspects. *Nutrition*, 19, 54. 2003. DOI: 10.1016/s0899-9007(02)00833-x.

KOYDON, S., 2004. Contribution of sulfate-reducing bacteria in soil to degradation and retention of COD and sulfate. Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieur von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH). Karlsruhe.

KUBAN, V.; DASGUPTA, P. K.; MARX, J. N. Nitroprusside and methylene blue methods for silicone membrane differentiated flow injection determination of sulfide in water and wastewater. *Analytical chemistry*. 64(1), 36-43, 1992. DOI: 10.1021/ac00025a008.

LAKOWICZ, J. R. Principles of Fluorescence Spectroscopy. 3rd Edition, Springer, Berlin 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-46312-4>.

LAWRENCE, N. S.; DAVIS, J.; COMPTON, R. G. Analytical strategies for the determination of sulfide: a review. *Talanta*. 52, 771-784, 2000. DOI: 10.1016/s0039-9140(00)00421-5.

LEAL, V. G.; BATISTA, A. D.; PETRUCI, J. F. DA. S. 3D-printed and fully portable fluorescent-based platform for sulfide determination in waters combining vapor generation extraction and digital images treatment. *Talanta*. 222, 7. 2021. DOI: 10.1016/j.talanta.2020.121558.

LECHNER, A. M.; FOODY, G. M.; BOYD, D. S. Applications in Remote Sensing to Forest Ecology and Management. *One Earth*, 2(5), 405–412. 2020. DOI: 10.1016/j.oneear.2020.05.001.

LEE, S.; HWANG, H.; LEE, J. Y. Vertical Measurements of Roadside Air Pollutants Using a Drone. *Atmos. Pollut. Res.* 2022, 13 (12), 101609. DOI: 10.1016/j.apr.2022.101609.

LI, X. B.; PENG, Z. R.; LU, Q. C.; WANG, D.; HU, X. M.; WANG, D.; LI, B.; FU, Q.; XIU, G.; HE, H. Evaluation of Unmanned Aerial System in Measuring Lower Tropospheric Ozone and Fine Aerosol Particles Using Portable Monitors. *Atmos. Environ.* **2020**, 222 (October 2019), 117134. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2019.117134](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117134).

Li, X., Guo, Y., 2018. Application of LiDAR technology in power line inspection. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 382, 052025, 2018. DOI: [10.1088/1757-899X/382/5/052025](https://doi.org/10.1088/1757-899X/382/5/052025).

LI, Y.; ZENG, H.; XU, J.; Li, Y.; ZHANG, L.; LIANG, Y.; Zhang, M. Long path gas-phase absorption detector using a 235 nm deep-UV LED source for the determination of nitrite, nitrate and total dissolved nitrogen in waters. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 51. 100205. 2023. DOI: [10.1016/j.cjac.2022.100205](https://doi.org/10.1016/j.cjac.2022.100205).

LICHOTA, A.; SZABELSKI, M.; KROKOSZ, A. Quenching of Protein Fluorescence by Fullerenol C60(OH)36 Nanoparticles. *Int. J. Mol. Sci.* 2022, 23, 12382. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms232012382>.

LIN, C.; GILLESPIE, J.; SCHUDER, M. D.; DUBERSTEIN, W.; BEVERLAND, I. J.; HEAL, M. R. Evaluation and Calibration of Aeroqual Series 500 Portable Gas Sensors for Accurate Measurement of Ambient Ozone and Nitrogen Dioxide. *Atmos. Environ.* 2015, 100 (2), 111–116. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2014.11.002](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.002).

LUCHIARI, N. da C.; SILVA, G. A. da. MARASCO JÚNIOR, C. A.; GOMES, P. C. F. de L. Development of miniaturized fluorimetric device for caffeine determination using a smartphone. *RSC Advances*, 9(60), 35033–35038, 2019. DOI: [10.1039/c9ra06220c](https://doi.org/10.1039/c9ra06220c).

MACHADO, C. C. S.; PETRUCI, J. F. da S.; SILVA, S. G. An IoT Optical Sensor for Photometric Determination of Oxalate in Infusions. *Microchem. J.* 2021, 168 (May). DOI: [10.1016/j.microc.2021.106466](https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106466).

MADIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; PARKER, J. Brock Biology of Microorganisms, Prentice Hall, 10th Edition, 2002.

MAINIER, F. B.; ROCHA, A. D. A. H₂S: Novas Rotas de Remoção Química e Recuperação de Enxofre. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2003.

MAINIER, F. B.; VIOLA, E. D. M. O sulfeto de hidrogênio (H₂S) e o meio ambiente. **II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT**, 2005.

MANOUCHEHRI, F.; IZADMANESH, Y.; AGHAEE, E.; GHASEMI, J. B. Experimental, computational and chemometrics studies of BSA-vitamin B6 interaction by UV–Vis, FT-IR, fluorescence spectroscopy, molecular dynamics

simulation and hard-soft modeling methods. *Bioorganic Chemistry*, v. 68, p. 124–136, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2016.07.014>.

MARTIN, R. V. Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, 42 (34), 7823–7843. 2008. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.018.

MARTINS, C. R.; ANDRADE, J. B. Química atmosférica do enxofre (IV): Emissões, reações em fase gasosa e impacto ambiental. *Química Nova*, 25, 259–272, 2002. DOI: 10.1590/S0100-40422002000200015.

MONICA, J. H. R.; SHARMA, J.; DAVE P. Y. Anticounterfeiting technology – a luminescent path: short review, *J. Adv. Chem. Sci.* 7(1) (2021) 706–710. DOI: <https://doi.org/10.30799/jacs.233.21070103>.

MORAIS, C DE L. M. DE. CARVALHO, J. C. SANT'ANNA, C.; EUGÊNIO, M.; GASPAROTTO, LUIZ H. S. LIMA, K. M.G. A low-cost microcontrolled photometer with one color recognition sensor for selective detection of Pb²⁺ using gold nanoparticles. *Analytical Methods*, 7(18), 7917–7922. 2015. DOI: 10.1039/c5ay01762a.

MOURA, R. M. de. Protótipo com sensores embarcados em rpa/drone para coleta de dados da qualidade do ar. 2024. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG

MOURÃO, R. S.; VALE, B. R. C.; FONSECA, A. F. V.; CARVALHO T. A. S.; SCHIAVON, M. A. Espectroscopia de fluorescência: dos fundamentos à influência dos parâmetros instrumentais para análises de corantes orgânicos e nanopartículas inorgânicas. *Quim. Nova*, Vol. 47, No. 2, e-20230095, 1-10, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20230095>.

OLIVEIRA, G. de C. Sensor de cores RGB para determinações colorimétricas: avaliação e análise quantitativa de soluções coloridas. 2022. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG, 2022.

OLIVEIRA, L. L. G. de. DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE ANÁLISE POR INJEÇÃO SEQUENCIAL APLICADO A DETERMINAÇÃO DE VANÁDIO EM ÁGUA. 2016. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina – PR, 2016.

OSHA - OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. Hydrogen Sulfide Release. Disponível em: <<https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA4204.pdf>>. Acesso em 18 maio 2023.

OSHA - OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. Hydrogen Sulfide Health Hazards. Disponível em: <<https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide/hazards>>. Acesso em 20 dezembro 2024.

PALENZUELA, C. L. M.; PUMERA, M. (Bio)Analytical chemistry enabled by 3D printing: Sensors and biosensors. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 103, 110–118. 2018. DOI: [10.1016/j.trac.2018.03.016](https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.03.016).

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. Introdução à espectroscopia. Tradução da 5ª edição norte-americana. CENGAGE Learning, São Paulo, 2015.

PENA-PEREIRA, F.; WOJNOWSKI, W.; TOBISZEWSKI, M. (2020). AGREE – Analytical GREENness metric approach and software. *Analytical Chemistry*. DOI: [10.1021/acs.analchem.0c01887](https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01887)

PETERSON, P. J. D.; AUJLA, A.; GRANT, K. H.; BRUNDLE, A. G.; THOMPSON, M. R.; HEY, J. VANDE; LEIGH, R. J. Practical Use of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors for Measuring Nitrogen Dioxide and Ozone in Urban Environments. *Sensors (Switzerland)* 2017, 17 (7), 1–25. DOI: [10.3390/s17071653](https://doi.org/10.3390/s17071653).

PETRUCI, J. F. DA S.; BARRETO, D. N.; DIAS, M. A.; FELIX, E. P.; CARDOSO, A. A. Analytical Methods Applied for Ozone Gas Detection: A Review. *TrAC - Trends Anal. Chem.* **2022**, 149. DOI: [10.1016/j.trac.2022.116552](https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116552).

PETRUCI, J. F. da S.; CARDOSO, A. A. A New Palladium Chelate Compound for Determination of Sulfide. *Microchem. J.* 2013, 106 (2013), 368–372. DOI: [10.1016/j.microc.2012.09.009](https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.09.009).

PETRUCI, J. F. da S.; CARDOSO, A. A. Portable and Disposable Paper-Based Fluorescent Sensor for In Situ Gaseous Hydrogen Sulfide Determination in Near Real-Time. *Analytical Chemistry*, 88(23), 11714–11719, 2016. DOI: [10.1021/acs.analchem.6b03325](https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b03325).

PETRUCI, J. F. da S.; CARDOSO, A. A. Sensitive luminescent paper-based sensor for the determination of gaseous hydrogen sulfide. *Anal. Analytical Methods*, 7(6), 2687–2692, 2015. DOI: [10.1039/c4ay02952f](https://doi.org/10.1039/c4ay02952f).

PETRUCI, J. F. DA S.; HAUSER, P. C.; CARDOSO, A. A. Colorimetric Paper-Based Device for Gaseous Hydrogen Cyanide Quantification Based on Absorbance Measurements. *Sensors Actuators, B Chem.* 2018, 268, 392–397. DOI: [10.1016/j.snb.2018.04.101](https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.04.101).

PIEDRAHITA, R.; XIANG, Y.; MASSON, N.; ORTEGA, J.; COLLIER, A.; JIANG, Y.; LI, K.; DICK, R. P.; LV, Q.; HANNIGAN, M.; SHANG, L. The next Generation of Low-Cost Personal Air Quality Sensors for Quantitative Exposure Monitoring. *Atmos. Meas. Tech.* 2014, 7 (10), 3325–3336. DOI: [10.5194/amt-7-3325-2014](https://doi.org/10.5194/amt-7-3325-2014).

POCHWAŁA, S.; GARDECKI, A.; LEWANDOWSKI, P.; SOMOGYI, V.; ANWEILER, S. Developing of Low-Cost Air Pollution Sensor—Measurements with the Unmanned Aerial Vehicles in Poland. *Sensors (Switzerland)* 2020, 20 (12), 1–17. DOI: [10.3390/s20123582](https://doi.org/10.3390/s20123582).

POWER, S. M.; FREE, L.; DELGADO, A.; RICHARDS, C.; ALVAREZ-GOMEZ, E.; BRICIU-BURGHINA, C.; REGAN, F. A novel low-cost plug-and-play multi-spectral LED based fluorometer, with application to chlorophyll detection. *Anal. Methods*, 2023, 15, 5474-5482 DOI: <https://doi.org/10.1039/D3AY00991B>.

QIAN, Y.; LUO, Y.; SI, F.; ZHOU, H.; YANG, T.; YANG, D.; XI, L. Total Ozone Columns from the Environmental Trace Gases Monitoring Instrument (EMI) Using the DOAS Method. *Remote Sens.* 2021, 13 (11). DOI: 10.3390/rs13112098.

RANZAN, L. Metodologias para seleção de variáveis explicativas e detecção de inconformidades de predição aplicadas à espectroscopia por fluorescência. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. 2021.

RUIZ-JIMENEZ, J.; ZANCA, N.; LAN, H.; JUSSILA, M.; HARTONEN, K.; RIEKKOLA, M. L. Aerial Drone as a Carrier for Miniaturized Air Sampling Systems. *J. Chromatogr. A* 2019, 1597 (2), 202–208. DOI: [10.1016/j.chroma.2019.04.009](https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.04.009).

SAADATI, M. A simple method for colourimetric determination of silver using a home-made double beam photometer. *South African Journal of Chemistry*, 77(1), 2023. DOI: <https://doi.org/10.17159/0379-4350/2023/v77a03>.

SALIMI, M.; NOUROOZI, S. Photometric flow injection analysis of As(III) by using a homemade, LED-based flow-cell device and methyl orange reagent, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 283, 121713. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121713>.

SANTOS, G. R.; PAULINO, G. S. P.; BORGES, G. P. I. SANTIAGO, A. F.; SILVA, G. A. da. Avanços analíticos baseados em modelos de calibração de primeira ordem e espectroscopia uv-vis para avaliação da qualidade da água: uma revisão - parte 1. *Quim. Nova*, Vol. 45, No. 3, 314-323, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170830>.

SANTOS, V. B. dos; OLIVEIRA, W. M. S. de. ALMEIDA, J. P. B. de. FOGUEL, M. V.; SUAREZ, W. T.; OLIVEIRA, J. L. de. RGB-LED-Photometer and digital image-based method using a smartphone for chemistry and physics teaching. *Quim. Nova*, Vol. 46, No. 9, 924-930. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20230065>.

SCHNEIDER, P.; CASTELL, N.; VOGT, M.; DAUGE, F. R.; LAHOZ, W. A.; BARTONOVA, A. Mapping Urban Air Quality in near Real-Time Using Observations from Low-Cost Sensors and Model Information. *Environ. Int.* 2017, 106 (June), 234-247. DOI: 10.1016/j.envint.2017.05.005.

SCHOLTZ, A.; PAULSON, J.; NUNEZ, V.; ARMANI, A. M. Open-source Magnetophotometer (MAP) for Nanoparticle Characterization. *Instrumentation*

and Detectors. 2401.01903, 2023. DOI:
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.01903>.

SCHUBERT, E. F. Light-Emitting Diodes, 2nd ed., Rensselaer Polytechnic Institute, New York. 2023.

SCI-TEC Instruments Inc. BREWER MKII spectrophotometer operator's manual. Revision A, Saskatoon, Canada, 1999.

SEABROOK, J. A.; WHITEWAY, J.; STAEBLER, R. M.; BOTTENHEIM, J. W.; KOMGUEM, L.; GRAY, L. H.; BARBER, D.; ASPLIN, M. LIDAR measurements of Arctic boundary layer ozone depletion events over the frozen Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 116, 2011. DOI:10.1029/2011jd016335

SILVA, C. R.; BARROS, V. A. F.; BASSO, L. C.; ZAGATTO, E. A. G. Spectrophotometric flow injection monitoring of sulfide during sugar fermentation. *Talanta*, 85, 1703-1705, 2011. DOI: 10.1016/j.talanta.2011.07.004.

SILVA, D. S. Desenvolvimento de procedimento para determinação fotométrica de etanol em bebidas destiladas sem uso de reagentes explorando o efeito Schlieren. 2015. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2015.

SILVA, M. T. DA. Simulações numéricas da sensibilidade de detecção de aerossóis ultrafinos no topo da troposfera Amazônica pela técnica lidar. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. 2022.

SILVA, O. C. Desenvolvimento de biossensores potenciométrico e óptico para determinação de H₂S empregando células íntegras de *Acidithiobacillus thiooxidans*. 2018. Tese (Doutorado em Ciência) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. 2018.

SILVA-NETO, H. A.; SOUSA, D da S.; DUARTE, L. C.; PETRUCI, J. F. da S.; COLTRO, W. K. T. Recent developments on aerial lab-on-a-drone platforms for remote environmental monitoring: A review. *Analytica Chimica Acta*, Volume 1337, 343544, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2024.343544>.

SKOOG, A. G.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. Fundamentos de Química Analítica. 9a ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

SOARES, W. M. Estimativa de figuras de mérito para um método de determinação de benzo(a)pireno em azeite de oliva por extração líquido-líquido sob baixa temperatura e espectroscopia de fluorescência. 2021. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG. 2021.

SOUSA, D. da S.; LEAL, V. G.; DOS REIS, G. T.; DA SILVA, S. G.; CARDOSO, A. A.; PETRUCI, J. F. da S. An Automated, Self-Powered, and Integrated

Analytical Platform for On-Line and In Situ Air Quality Monitoring. *Chemosensors* 2022, 10 (11), 1–13. DOI: [10.3390/chemosensors10110454](https://doi.org/10.3390/chemosensors10110454).

SOUZA, S. T. de. Desempenho de tubos geotêxteis não tecidos aplicados em estação de tratamento de água. 2021. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2021.

SUAREZ, W. T.; GABRIEL, W. L.; ALVARENGA JUNIOR, B. R. de. FRANCO, M. de O. K.; SANTOS, V. B. dos. A Simplistic Portable LED-Based Photometer for In Situ Determination of Copper in Sugarcane Spirits. *Food Analytical Methods*. 2018. DOI: [10.1007/s12161-018-1306-y](https://doi.org/10.1007/s12161-018-1306-y).

TARASICK, D.; GALBALLY, I. E.; COOPER, O. R.; SCHULTZ, M. G.; ANCELLET, G.; LEBLANC, T.; WALLINGTON, T. J.; ZIEMKE, J.; LIU, X.; STEINBACHER, M.; STAEHELIN, J.; VIGOUROUX, C.; HANNIGAN, J. W.; GARCÍA, O.; FORET, G.; ZANIS, P.; WEATHERHEAD, E.; PETROPAVLOVSKIKH, I.; WORDEN, H.; OSMAN, M.; LIU, J.; CHANG, K. L.; GAUDEL, A.; LIN, M.; GRANADOS-MUÑOZ, M.; THOMPSON, A. M.; OLTMANS, S. J.; CUESTA, J.; DUFOUR, G.; THOURET, V.; HASSLER, B.; TRICKL, T.; NEU, J. L. Tropospheric Ozone Assessment Report: Tropospheric Ozone from 1877 to 2016, Observed Levels, Trends and Uncertainties. *Elementa* 2019, 7. DOI: [10.1525/elementa.376](https://doi.org/10.1525/elementa.376).

TIBOLA, C. S.; DE MEDEIROS, E. P.; SIMEONE, M. L. F.; DE OLIVEIRA, M. A. Espectroscopia no infravermelho próximo para avaliar indicadores de qualidade tecnológica e contaminantes em grãos. Editora Embrapa, 200 p.. Brasília, DF 2018

TODA K, DASGUPTA PK, LI J, TARVER GA, ZARUS GM. Fluorometric field instrument for continuous measurement of atmospheric hydrogen sulfide. *Anal Chem* 73:5716–5724. 2001. DOI: [10.1021/ac010602g](https://doi.org/10.1021/ac010602g).

TODA, K.; KUWAHARA, H.; OHIRA, S. -I. On-Site Measurement of Trace-Level Sulfide in Natural Waters by Vapor Generation and Microchannel Collection. *Environmental Science & Technology*, 45(13), 5622–5628, 2011. DOI: [10.1021/es2006226](https://doi.org/10.1021/es2006226).

TRENCH, P.; DIMITROVA, M.; AVETISYAN, D. Huge CH₄, NO₂ and CO Emissions from Coal Mines in the Kuznetsk Basin (Russia) Detected by Sentinel-5P. *Remote Sens.* 15, 1590. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15061590>.

UDD, E.; SPILLMAN-JR, W. B. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2011.

VILLA, T. F.; JAYARATNE, E. R.; GONZALEZ, L. F.; MORAWSKA, L. Determination of the Vertical Profile of Particle Number Concentration Adjacent to a Motorway Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Environ. Pollut.* 2017, 230, 134–142. DOI: [10.1016/j.envpol.2017.06.033](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.033).

VILLA, T. F.; SALIMI, F.; MORTON, K.; MORAWSKA, L.; GONZALEZ, F. Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. *Sensors* (Switzerland) 2016, 16 (12). DOI: [10.3390/s16122202](https://doi.org/10.3390/s16122202).
VOGEL, A. I. Química Analítica Qualitativa. Rio de Janeiro: LTC, 2008, capítulo 4.

WAGNER, G. A.; PLUSQUELLIC, D. F. Ground-based, integrated path differential absorption LIDAR measurement of CO₂, CH₄, and H₂O near 16µm. *Applied Optics*, 55(23), 6292, 2016. DOI: [10.1364/ao.55.006292](https://doi.org/10.1364/ao.55.006292).

WAGNER, T.; IBRAHIM, O.; SHAIGANFAR, R.; PLATT, U. Mobile MAX-DOAS Observations of Tropospheric Trace Gases. *Atmos. Meas. Tech.* 2010, 3 (1), 129–140. DOI: [10.5194/amt-3-129-2010](https://doi.org/10.5194/amt-3-129-2010).

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. Air pollution. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1>. Acesso em 10 abril 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021.

XU, J.; HAO, M.; SUN, Q.; TANG, L. Comparative studies of interaction of β-lactoglobulin with three polyphenols. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. DOI: [10.1016/j.ijbiomac.2019.06.053](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.053).

YILMAZ, C. S. Assessing air pollutant emissions in the aftermath of the 2021 forest fires in marmaris and manavgat, türkiye: insights from satellite-based monitoring, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-4/W9-2024, 329–336, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-329-2024>.

YOSHIMURA, R.; KOHTOKU M.; FUJII, K.; SAKAMOTO, T.; SAKAI, Y. Highly Sensitive Laser Based Trace-gas Sensor Technology and Its Application to Stable Isotope Ratio Analysis. *NTT Technical Review*, v. 12, 2014. DOI: [10.53829/ntr201404fa7](https://doi.org/10.53829/ntr201404fa7).

ZHANG, L. L.; YUE, T. X.; WILSON, J. P.; WANG, D. Y.; ZHAO, N.; LIU, Y.; LIU, D. D.; DU, Z. P.; WANG, Y. F.; LIN, C. ZHENG, Y. Q. GUO, J. H. Modelling of XCO₂ Surfaces Based on Flight Tests of TanSat Instruments. *Sensors*, 16(11), 1818, 2016. DOI: [10.3390/s16111818](https://doi.org/10.3390/s16111818)

ZHOU, X.; LEE, S.; XU, Z.; YOON, J. Recent Progress on the Development of Chemosensors for Gases. *Chem. Rev.* 2015, 115 (15), 7944–8000. DOI: [10.1021/cr500567r](https://doi.org/10.1021/cr500567r).

ZONTA, G.; RISPOLI, G.; MALAGÙ, C.; ASTOLFI, M. Overview of Gas Sensors Focusing on Chemoresistive Ones for Cancer Detection. *Chemosensors* 2023, 11, 519. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors11100519>.