

AnaliseAr: dispositivo de amostragem passiva para medições simultâneas a baixo custo de 16 contaminantes/poluentes atmosféricos gasosos

AnaliseAr: a passive sampling device for low-cost simultaneous measurements of 16 atmospheric contaminants/pollutants

Franciele Oliveira Campos da Rocha¹ , Vânia Palmeira Campos^{2*} 

RESUMO

Um novo sistema de amostragem passiva de gases atmosféricos é apresentado. Com o *kit* AnaliseAr, é possível medir 16 contaminantes/poluentes atmosféricos simultaneamente, em ambientes externos, internos e/ou remotos. Cada *kit*, confeccionado em polipropileno, contém 15 amostradores passivos (APs), do tipo difusivo, de baixo custo e de simples operação. Filtros impregnados ou adsorventes são usados nos APs, fornecendo medições de dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, ozônio, óxidos de nitrogênio, amônia, aldeídos e ácidos orgânicos (fórmico e acético), ácidos inorgânicos (ácidos sulfídrico, clorídrico e nítrico) e compostos orgânicos voláteis – benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos. A análise dos gases fixados no meio de coleta envolve técnicas de cromatografia líquida como cromatografia líquida de alta eficiência, cromatografia iônica e cromatografia gasosa, além de espectrofotometria de absorção molecular. A precisão dos APs foi avaliada contra analisadores contínuos e outras técnicas de amostragem ativa de ar. A aplicação do AnaliseAr no entorno da Baía de Todos os Santos (BA) apresentou resultados com boa precisão e exatidão, conforme o limite recomendado pela União Europeia.

Palavras-chave: amostragem passiva; poluentes atmosféricos; qualidade do ar.

ABSTRACT

A new passive atmospheric gas sampling system is presented. With the *AnaliseAr* kit, it is possible to measure 16 atmospheric contaminants/pollutants simultaneously, in external, internal and/or remote environments. Each kit, made of polypropylene, contains 15 passive samplers (PS), diffusive type, of low cost and simple operation. Impregnated or adsorbent filters are used in the PS, providing measurements of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ozone, NO_x, ammonia, aldehydes and organic acids (formic and acetic), inorganic acids (hydrogen sulfide, hydrochloric and nitric acids), and volatile organic compounds: Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes (BTEX). The analysis of the fixed gases in the collection medium involves liquid chromatographic techniques such as HPLC and IC and gas chromatography (CG-FID), in addition to molecular absorption spectrophotometry. The accuracy of the PS was evaluated against continuous analyzers and other active air sampling techniques. The application of *AnaliseAr* in the surroundings of Baía de Todos os Santos, Bahia, presented results with good precision and accuracy, within the limit recommended by the European Union.

Keywords: passive sampling; atmospheric pollutants; air quality.

INTRODUÇÃO

Pesquisas relacionadas à poluição atmosférica e a seus efeitos, principalmente em áreas urbanas, vêm sendo intensificadas em todo o mundo, em função do aumento de emissões antrópicas de gases poluentes. Isso ocorre por causa do crescimento populacional e do consequente aumento do tráfego veicular (SILVA; VIEIRA, 2017). Segundo a Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OECD, 2016), a poluição atmosférica urbana pode ser responsável pela morte de seis a nove milhões de pessoas por ano até 2060.

Em função da crescente poluição atmosférica e com base no entendimento de que nenhum nível de poluição do ar é seguro para os seres humanos, a Organização Mundial da Saúde atualizou recentemente (2021) suas recomendações em relação aos padrões de poluição antes estabelecidos pelas suas diretrizes de qualidade do ar de 2005, destacando que, se essas diretrizes forem implementadas e atendidas pela gestão pública, haverá redução importante de mortes evitáveis causadas por poluentes atmosféricos (WHO, 2021).

¹Universidade Federal de Roraima, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Química - Boa Vista (RR), Brasil.

²Universidade Federal da Bahia, Instituto de Química - Salvador (BA), Brasil.

***Autora correspondente:** francieleocr@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia e Edza Planejamento Consultoria e Informática.

Recebido: 06/06/2022 - **Aceito:** 03/02/2023

A amostragem de componentes atmosféricos é um processo complexo, pois o ar é um sistema heterogêneo e multifásico cuja composição varia espacial e temporalmente, sendo considerado uma das matrizes ambientais de maior dificuldade na obtenção de amostras representativas (KRUPA; LEGGE, 2000; MELYMUK *et al.*, 2016). Os poluentes não apenas se difundem, mas também reagem quimicamente na atmosfera, resultando na formação de poluentes secundários. Adicionalmente, gases podem ser convertidos a partículas, tornando ainda mais complexo esse tipo de amostragem. Além disso, pode ocorrer formação de artefatos durante e após a amostragem (CAMEL; CAUDE, 1995; MELYMUK *et al.*, 2016). Dessa forma, torna-se importante o desenvolvimento de métodos para amostragem de ar que forneçam informações confiáveis sobre as concentrações dos poluentes e que ao mesmo tempo sejam de baixo custo, sustentáveis e usados em diferentes tipos de área e escalas.

Amostradores passivos (APs) são dispositivos capazes de fixar compostos gasosos ou vapores da atmosfera a uma taxa controlada por processos físicos, tais como difusão e permeação, não envolvendo o movimento ativo do ar por meio do amostrador, ou seja, não necessitando de bomba de sucção para forçar o ar a ser amostrado (CRUZ; CAMPOS, 2008; ZABIEGAŁA *et al.*, 2010). O uso desse tipo de dispositivo passou a ser difundido em 1973, quando Palmes e Gunnison desenvolveram um amostrador difusivo em formato de tubo para SO₂ (PALMES; GUNNISON, 1973), no entanto apenas na década de 1980 estudos sobre a sua aplicabilidade para o monitoramento ambiental externo foram desenvolvidos (CASSINELLI; HULL; CUENDET, 1985).

Os amostradores tipo tubo são os mais usados em ambientes externos. Sua baixa taxa de amostragem, em função da baixa razão entre a área da seção transversal e o percurso de difusão, pode ser compensada por longos períodos de exposição.

Vários trabalhos têm sido publicados relatando o desenvolvimento de amostradores passivos, com diferentes geometrias, meios de coleta e aplicações (CRUZ; CAMPOS, 2002; BUCZYNSKA *et al.*, 2009; CAMPOS *et al.*, 2010; MARĆ; NAMEŚNIK; ZABIEGAŁA, 2014; LIN *et al.*, 2015; KIROS *et al.*, 2016; SANTANA *et al.*, 2017; SOUZA; FRANCISCO; CARDOSO, 2017; ALFOLDY *et al.*, 2019). Porém, segundo Souza, Francisco e Cardoso (2017), a comercialização de amostradores passivos ainda é desproporcional ao seus níveis de praticidade, exatidão e precisão comparáveis a métodos ativos, como é o caso do AnaliseAr. Há grande escassez desses produtos para comercialização no país, e, por outro lado, são grandes as dificuldades para adquiri-los no exterior, em função do processo de importação e custos.

Por causa da sua simplicidade, quanto ao manuseio, operação e boa relação custo-benefício, a amostragem passiva vem sendo cada vez mais utilizada em pesquisa e para atender às exigências do monitoramento de gases poluentes convencionais e não convencionais (SEETHAPATHY; GÓRECKI; LI, 2008).

Já em 2003 era demonstrado o uso expandido de amostradores passivos em programas piloto oficiais sobre estudos de qualidade do ar (CARMICHAEL *et al.*, 2003). Como exemplos disso, podem ser citados os programas fundados por Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA) Weather Service e por Japan Trust Fund at The World Bank, sendo este último inserido no RAINS-Asia Phase-II, e um estudo piloto, em escala regional e urbana, fundado por Swedish Consultancy Fund at the World Bank (CARMICHAEL *et al.*, 2003). Outros exemplos são os relatórios anuais

do Departamento do Senado para o Meio Ambiente, Transporte e Proteção Climática de Berlim, Alemanha, que mostram o uso de amostradores passivos no monitoramento oficial do ar naquele país (SUVK, 2018).

Neste trabalho é apresentado um dispositivo de amostragem passiva (*kit* AnaliseAr) simples, robusto e de baixo custo capaz de permitir a avaliação da concentração de poluentes (substância, material gasoso ou aerossol que foi introduzido no ar, seja por atividade humana, seja por processos naturais, em concentração suficiente para produzir efeitos em humanos, animais, vegetação ou materiais) e contaminantes (substância, material gasoso ou aerossol presente em uma massa de ar em níveis mais altos do que no ar limpo) (IUPAC, 1997). O *kit* permite a avaliação de 16 contaminantes/poluentes atmosféricos gasosos, entre:

- convencionais: dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃);
- não convencionais: NOx, amônia (NH₃);
- aldeídos: fórmico e acético (HCHO e CH₃CHO);
- ácidos orgânicos: fórmico e acético (HCOOH e CH₃COOH);
- ácidos inorgânicos: sulfídrico, clorídrico e nítrico (H₂S, HCl e HNO₃);
- compostos orgânicos voláteis: benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX).

O AnaliseAr foi desenvolvido para controle da atmosfera de diferentes tipos de área, com vários níveis de concentração de poluentes, visando principalmente ao diagnóstico da qualidade do ar associada à saúde humana. Possibilita, como nenhum outro dispositivo/equipamento divulgado até hoje, monitorar simultaneamente e com eficiência três dos quatro gases padrão de qualidade do ar, além de mais de uma dezena de outros poluentes não convencionais, os quais podem ser altamente prejudiciais à saúde da população e/ou ao meio ambiente. Essa é uma grande vantagem em relação aos sofisticados e caros analisadores contínuos, que normalmente utilizam um equipamento para cada um dos gases contaminantes atmosféricos de interesse.

Além disso, sabe-se que hoje não é somente importante medir os padrões de qualidade do ar. É também de grande relevância poder medir poluentes, que, apesar de não convencionais no nosso país, são altamente perigosos e por isso com frequência contemplados em legislações internacionais. Eles estão associados sobretudo à qualidade de vida, sendo assim de interesse geral o conhecimento dos seus níveis de concentração no ar, visando subsidiar ações de controle e proteção à saúde humana, fauna e flora (DE DONNO *et al.*, 2018; SANTANA *et al.*, 2019; MILLER *et al.*, 2022). Isso é um grande diferencial do AnaliseAr, que inclui medidas de compostos cancerígenos na atmosfera, como por exemplo formaldeído e benzeno, entre vários outros.

É notória a importância do desenvolvimento e da aplicação de um dispositivo do tipo do AnaliseAr, o qual agrega a inovação de medidas de muitos poluentes em um único dispositivo, ao contrário dos existentes, que medem poluentes isolados. O dispositivo apresentado está acompanhado de comprovações da exatidão e precisão das suas medidas, o que também já foi demonstrado em muitos outros trabalhos de APs propostos e aplicados individualmente (CRUZ; CAMPOS, 2002, 2008; CRUZ *et al.*, 2004; CRUZ *et al.*, 2005; CAMPOS *et al.*, 2006; CAMPOS *et al.*, 2010; LIMA, 2011; SANTANA *et al.*, 2017; SANTANA *et al.*, 2018; CRUZ *et al.*, 2019; BARBOSA; CAMPOS; ROCHA, 2022).

PARTE EXPERIMENTAL

Descrição do kit de amostragem passiva

O *kit* AnaliseAr é fabricado por processo de injeção utilizando polipropileno e constituído de um conjunto de 15 APs (Figura 1). É capaz de captar simultaneamente 16 poluentes do ar (SO_2 , NO_2 , O_3 , NO_x , NH_3 , HCHO , CH_3CHO , HCOOH , CH_3COOH , H_2S , HCl , HNO_3 e BTEX). Além disso, inclui uma carcaça protetora para a etapa de amostragem, integrada ao conjunto dos APs para embalá-los e transportá-los adequadamente. O modelo do *kit* foi desenvolvido em parceria com a empresa EDZA Planejamento, Consultoria e Informática.

As dimensões e os meios de fixação dos poluentes, incluindo reagentes, de cada AP inserido no *kit* são os mesmos utilizados quando eles foram desenvolvidos isoladamente (CRUZ; CAMPOS, 2002; 2008; CRUZ *et al.*, 2004; CRUZ *et al.*, 2005; CAMPOS *et al.*, 2006; CAMPOS *et al.*, 2010; LIMA, 2011; SANTANA *et al.*, 2017; SANTANA *et al.*, 2018; CRUZ *et al.*, 2019; BARBOSA; CAMPOS; ROCHA, 2022). A configuração usada para o AP minimiza problemas com relação à velocidade facial na entrada do AP, resultantes da turbulência do ar e de outras interferências de amostragem, como por exemplo interferência do material particulado atmosférico.

Cada AP é composto de um corpo cilíndrico (12 mm de altura e 21 mm de diâmetro interno), fechado no fundo, contendo na entrada de ar uma membrana de *teflon* (Millipore, PTFE, 0,5 μm de poro, 25 mm de diâmetro, hidrofóbica lisa) protegida por uma tela de aço inoxidável (fio de 0,08 mm e malha de 0,125 mm). O meio de coleta, que é colocado após o espaço de difusão (no fundo do amostrador), é um filtro de celulose (exceto para aldeídos, quando se utiliza um filtro de fibra de vidro) impregnado com reagente específico para fixar o gás que difunde pelo amostrador. No caso do AP para H_2S , por ser bastante reativo e facilmente adsorvido sobre superfícies, a tela de aço inoxidável não é empregada, para evitar perdas do gás. No caso dos BTEX, em vez de filtro impregnado com reagente, usa-se 0,5 g de material adsorvedor (carvão

ativado), protegido por uma tela de aço inoxidável idêntica à da entrada de ar, a 2 mm do fundo do amostrador.

A aplicação do dispositivo foi testada em áreas urbanas com influência industrial em locais estratégicos no entorno da Baía de Todos os Santos (BA). Os amostradores passivos foram validados por comparação com técnicas de amostragem ativa utilizando analisadores contínuos, técnicas ativas descontínuas e amostradores passivos disponíveis comercialmente.

Princípio do funcionamento dos amostradores passivos

O princípio do funcionamento dos APs usados, que são do tipo difusivo, é baseado na difusão molecular do gás, a qual é uma função da temperatura e pressão do ar, por intermédio de uma camada estática de ar. A força motriz para o transporte do gás que está sendo amostrado é o gradiente de concentração do analito entre o ar circundante e a superfície de coleta (GÓRECKI; NAMIEŚNIK, 2002; CRUZ; CAMPOS, 2008; SEETHAPATHY; GÓRECKI; LI, 2008). Esse gradiente, em equilíbrio dinâmico, pode ser definido pela primeira lei de difusão de Fick (PALMES; LINDENBOOM, 1979) (Equação 1):

$$J = -D \cdot A \cdot \frac{dC}{dL} \quad (1)$$

Em que:

J = taxa de transferência de massa ($\mu\text{g h}^{-1}$);

A = área da seção transversal do percurso de difusão (m^2);

D = coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$);

dC/dL = coeficiente instantâneo de mudança na concentração ao longo do percurso ($\mu\text{g m}^{-4}$).

O sinal negativo na Equação 1 indica que a concentração do analito decresce na direção da difusão. Com o gradiente de concentração linear, a massa total do analito (m) transportada por difusão é calculada pela integração da primeira lei de difusão de Fick em função da massa amostrada e do tempo de amostragem (Equação 2):

$$m = D \cdot A \cdot \frac{(C - C_0)}{L} \cdot t \quad (2)$$

Em que:

D = coeficiente de difusão do analito ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$);

A = área da seção transversal do percurso de difusão (m^2);

C = concentração do analito no meio externo ($\mu\text{g m}^{-3}$);

C_0 = concentração do analito na superfície de coleta (considerada como 0, se o meio de coleta for 100% eficiente);

t = tempo de amostragem (h);

L = comprimento total do percurso de difusão (m).

Na Equação 2, a expressão $D \cdot A / L$ é definida como a taxa de amostragem e possui a mesma unidade ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) do fluxo de ar de amostradores convencionais ativos. Essa taxa de amostragem é calculada teoricamente por intermédio do coeficiente de difusão e da geometria do amostrador. Assumindo C_0 igual a 0 e rearranjando a Equação 2, a concentração média do gás no dispositivo é calculada pela Equação 3:

$$C = \frac{m \cdot L}{D \cdot A \cdot t} \quad (3)$$

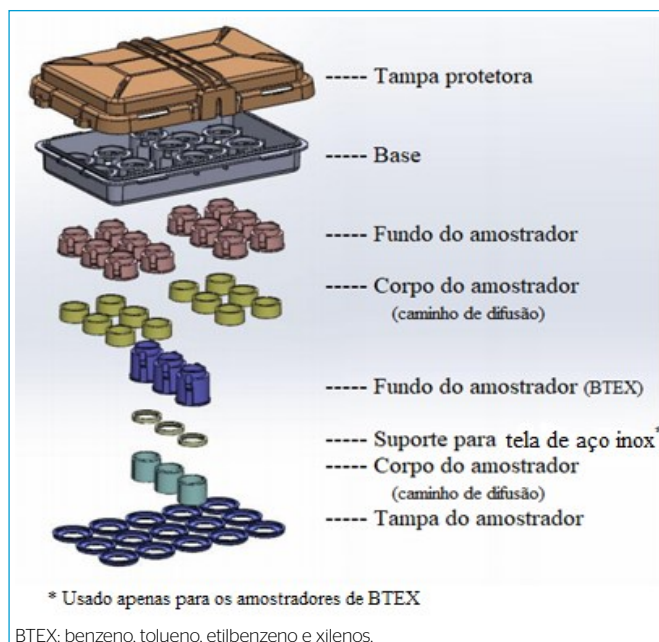


Figura 1 - Desenho esquemático do *kit* AnaliseAr.

Em que:

m = massa total coletada (µg);

L = comprimento do percurso de difusão (m);

D = coeficiente de difusão (m² s⁻¹);

A = área da seção transversal do percurso de difusão (m²);

t = tempo de amostragem (s).

Os coeficientes de difusão de vários compostos no ar foram calculados pela Equação 4, considerando os valores médios de temperatura (T, em K) e de pressão atmosférica (P, em atm) durante o período de amostragem. Os parâmetros a e b utilizados encontram-se tabelados por Nelson (1992).

$$D = \frac{0,0043 \cdot T^{1,5} \cdot a}{P \cdot b} \tag{4}$$

Instrumentos e procedimentos

Escolha do meio de coleta para cada amostrador passivo

Os filtros colocados no fundo dos APs são impregnados com 200 µL da solução absorvedora (Tabela 1) adicionada com auxílio de micropipeta. Essas soluções foram escolhidas em estudo prévio realizado usando-se diferentes soluções selecionadas na literatura (PALMES; GUNNISON, 1973; KOUTRAKIS *et al.*, 1993; KROCHMAL; KALINA, 1997; ZHOU; SMITH, 1997; FERM; SVANBERG, 1998; KRUPA; LEGGE, 2000; LAN *et al.*, 2004; CAMPOS *et al.*, 2006; SANTANA *et al.*, 2017).

Os testes para a escolha das soluções a serem usadas nos diferentes APs como meio de coleta consistiram basicamente em borbulhamento de atmosfera padrão gerado por diluição do gás de interesse puro comercializado em cilindro ou por tubo de permeação, cuja taxa de permeação foi previamente determinada gravimetricamente. O tubo era mantido termostatizado. Foram empregados três borbulhadores em série contendo em cada um deles 10 mL

da solução teste. Nitrogênio comercial foi usado como gás de arraste à vazão de 40 L h⁻¹ por períodos de 1 h (Figura 2).

Montagem dos amostradores

Os filtros (25 mm de diâmetro) de celulose ou fibra de vidro (no caso do AP para aldeídos) a serem adaptados após impregnados no fundo do amostrador passivo como meio de coleta foram lavados três vezes com água ultrapura em ultrassom e imersos em álcool etílico por 15 min, sendo posteriormente

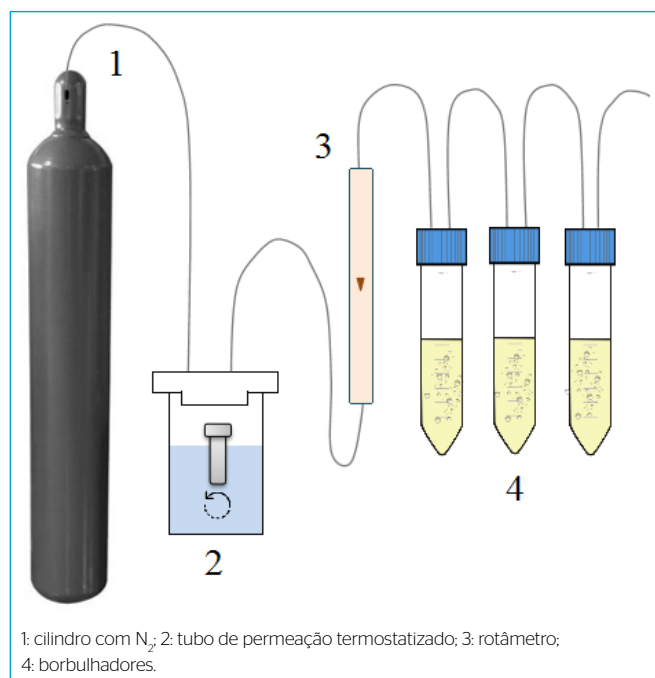


Figura 2 - Sistema de geração de atmosfera padrão utilizando tubo de permeação.

Tabela 1 - Metodologia analítica para amostragem, extração e análise dos poluentes/contaminantes fixados no amostradores passivos.

Analito	Impregnação	Extração	Análise	Referência
SO ₂	Na ₂ CO ₃	H ₂ O 0,3%	Cromatografia iônica (IC) Coluna de separação: IC ICE-AS1 4X250 mm - Thermo Fisher. Autossupressão Altech DS-PLUS	Campos <i>et al.</i> (2010)
O ₃	NaNO ₂ + Na ₂ CO ₃ ^a + glicerol	H ₂ O	Coluna de separação: IonPac AS11 (250 × 4 mm), Dionex	Cruz <i>et al.</i> (2019)
HCl e HNO ₃	TEA ^b + glicerol			
CH ₃ COOH e HCOOH	TEA	H ₂ O	Espectrofotometria de absorção molecular UV-Vis, λ = 540 nm (método de Griess Saltzman)	Campos <i>et al.</i> (2010); Barbosa, Campos e Rocha (2022)
NO ₂	TEA + PTIO ^c			
NH ₃	Ácido oxálico	H ₂ O	Espectrofotometria de absorção molecular UV-Vis, λ = 630 nm (método azul de indofenol)	Lima (2011)
H ₂ S	Acetato de zinco + NaOH + citrato trissódico	H ₂ O	Espectrofotometria de absorção molecular UV-Vis, λ = 670 nm (método azul de metileno)	Campos <i>et al.</i> (2010)
CH ₃ CHO HCHO	2,4-DNPH ^d + glicerol	Acetonitrila	Cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) com detecção UV-Vis, λ = 360 nm. Coluna de separação: Zorbax ODS 5 µm, 4,6 × 250 mm - Agilent	Santana <i>et al.</i> (2017)
BTEX	Carvão ativo de porosidade 30 - 50 mesh	Tetracloroeto de carbono	Cromatografia a gás com detecção por ionização em chama (GC-FID). Coluna de separação: HP-5, 30 m × 0,32 mm ID × 0,25 filme - Agilent	Santana <i>et al.</i> (2018)

secos em estufa a 50°C. Todas as partes dos amostradores utilizadas (Figura 1) foram também lavadas duas vezes com Extran neutro 2%, enxaguadas com água ultrapura e secas em temperatura ambiente. Após a impregnação, os filtros deveriam ser secos em dessecadores contendo sílica gel, por 48 h; no caso do AP para aldeídos, por 24 h. Eles foram então montados nos amostradores, os quais, em triplicata, foram encaixados no *kit*. A partir daí, filtros impregnados e adsorventes (no caso de BTEX) foram então protegidos de exposição, fechando-se a caixa protetora/transportadora até o início da amostragem (Figura 3).

Metodologia analítica

As análises químicas para medir todos os gases amostrados envolvem diferentes metodologias, visto que o AnaliseAr pode amostrar 16 poluentes/contaminantes do ar.

Após exposição dos APs, a extração dos analitos fixados nos filtros impregnados foi realizada em banho de ultrassom (Bransonic 3210 R-MT) sem aquecimento, seguido de centrifugação em microcentrífuga a 13.500 rpm (ambos por 15 min). A Tabela 1 apresenta as soluções de impregnação, soluções de extração e técnicas analíticas utilizadas.

Testes de desempenho dos amostradores passivos

O desempenho de cada AP incluído no *kit* AnaliseAr foi testado isoladamente, no período do seu desenvolvimento (CRUZ; CAMPOS, 2002, 2008; CRUZ *et al.*, 2004; CRUZ *et al.*, 2005; CAMPOS *et al.*, 2006; CAMPOS *et al.*, 2010; LIMA, 2011; SANTANA *et al.*, 2017; SANTANA *et al.*, 2018; CRUZ *et al.*, 2019; BARBOSA; CAMPOS; ROCHA, 2022). Essa avaliação foi feita em laboratório, usando câmara de exposição ou em campo, por meio de medidas simultâneas mediante outros métodos.

Os testes para determinação da exatidão e precisão das medidas feitos com os APs consideraram como fatores que poderiam afetá-los a velocidade facial, à qual um AP pode ser submetido quando exposto à atmosfera ambiental real; a umidade relativa e temperatura do ar; o tempo de exposição; substâncias interferentes; transporte e tempo de estocagem.

A câmara de exposição (Figura 4) usada em testes de desempenho dos APs é feita em *teflon*, com 30 cm de diâmetro e 120 cm de comprimento, contendo no seu interior um pequeno ventilador para minimizar o efeito de estagnação da atmosfera dentro da câmara, promovendo sua homogeneização e permitindo a simulação de diferentes velocidades faciais. Ela é acoplada a um sistema de

diluição de gás utilizando-se ar limpo, possibilitando variar na câmara a concentração do gás em estudo. Um sistema de simulação da umidade relativa dentro da câmara também é presente, variando diferentes proporcionalidades entre as linhas de ar limpo úmido e seco.

Quando não foi possível dispor do gás de interesse comercialmente puro, para uso na câmara, o amostrador passivo foi validado em campo. Nesse caso, este foi exposto paralelamente a medidas usando técnicas de amostragem ativas contínuas, quando se dispunha do analisador, ou descontínuas, em caso contrário, e ainda paralelamente com outros APs disponíveis comercialmente.

Limite de detecção e limite de quantificação do amostrador passivo

Para determinação do limite de detecção (LD) e limite de quantificação (LQ) do AP, foram utilizados brancos de campo com filtros impregnados retirados de APs não expostos ao ar ambiente, mas preparados, transportados para o campo e analisados da mesma forma que os APs expostos. Para tal, foram usadas as Equações 5 e 6, para LD e LQ, respectivamente, descritas a seguir (IUPAC, 2002; INMETRO, 2016; ANVISA, 2017):

$$LD = \frac{3 * s_b}{B} \quad (5)$$

$$LQ = \frac{10 * s_b}{B} \quad (6)$$

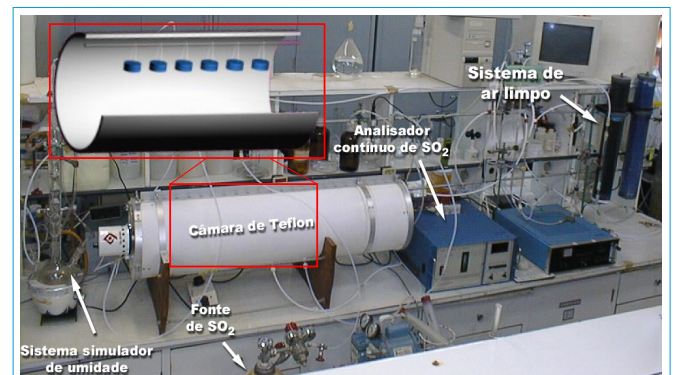


Figura 4 - Câmara de exposição para amostradores passivos: testes de desempenho.

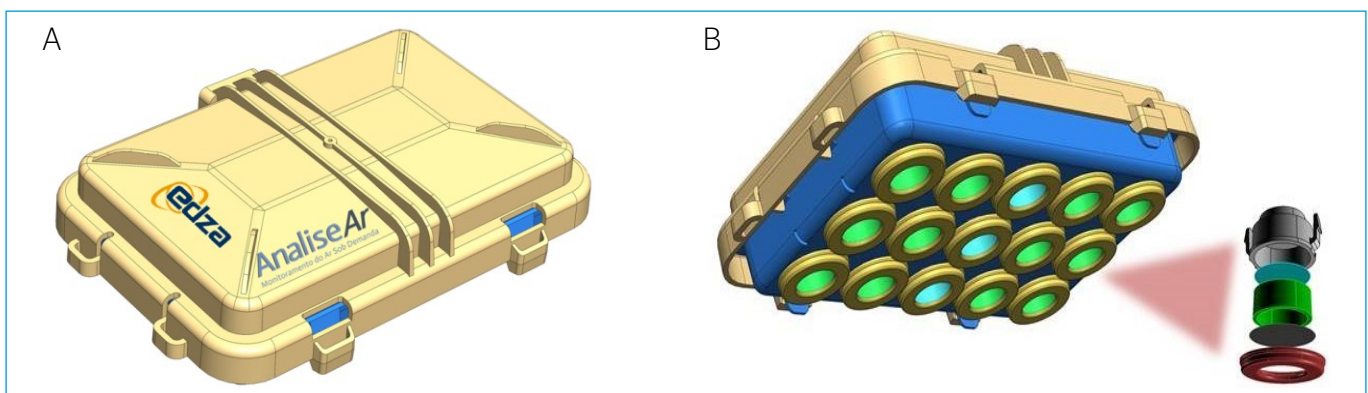


Figura 3 - Desenho do dispositivo AnaliseAr: (A) fechado para transporte/proteção e (B) aberto para exposição.

Em que:

s_b = desvio padrão da resposta de 10 brancos de campo;

B = coeficiente angular da curva analítica.

Segundo a International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC, 2002), em termos gerais, o LD é a menor quantidade ou concentração de analito na amostra que pode ser distinguida com segurança de 0 e não precisa fazer parte de uma validação. Assim, foram reportados apenas valores de LQ para cada AP nos resultados apresentados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em função da sua baixa taxa de amostragem, o bom desempenho de um AP está fortemente associado a um tempo de exposição suficientemente longo para capturar uma quantidade do analito que assegure a sua quantificação na análise química, sem ultrapassar a capacidade do meio de coleta. Dessa forma, a validação individual do desempenho dos APs em relação ao tempo de exposição é de grande importância. A Tabela 2 apresenta dados de validação individual em campo para todos os APs inseridos no *kit* AnaliseAr. A Figura 5 exemplifica essa validação referente a alguns amostradores passivos expostos paralelamente a medidas contínuas.

A Tabela 2 apresenta a estimativa da exatidão das medidas feitas com os amostradores passivos variando entre 1,3 (AP_{NH_3}) e 19% (AP_{H_2S}), conforme o limite recomendado ($\pm 25\%$) pela União Europeia na Diretiva 50/EC/2008 (EU, 2008) para esse tipo de medida em ambientes externos. Esses resultados são referentes a tempos de exposição mínimos dos amostradores passivos de três dias e máximo de 28, como mostra a tabela. Os detalhes da validação de cada AP, o que foi feito em diferentes períodos, à medida que o AP era desenvolvido/otimizado, podem ser encontrados nas referências citadas na última coluna da tabela.

Os resultados permitiram idealizar o AnaliseAr, incluindo dez APs para medida de todos aqueles contaminantes atmosféricos. Os ácidos fortes (HCl e HNO_3) são amostrados em um único AP, assim como os ácidos orgânicos ($HCOOH$ e CH_3COOH), os aldeídos (HCHO e CH_3CHO) e os compostos BTEX. Os outros seis APs amostram individualmente SO_2 , NO_2 , O_3 , NH_3 , NOx e H_2S . Dessa forma, 10 tipos de amostrador medem 16 contaminantes do ar, além de NO, que pode ser reportado subtraindo-se as concentrações de NOx e NO_2 determinadas. Para realizar medidas em triplicata, os contaminantes são distribuídos em dois *kits*, expostos simultaneamente, mas em períodos de sete e 14 dias, atendendo ao tempo de exposição ideal dos diferentes APs.

A primeira aplicação do sistema AnaliseAr foi feita no entorno da Baía de Todos os Santos, em cinco pontos estratégicos, cuja atmosfera tem influência de emissões veiculares e industriais. Entre esses pontos, quatro deles estão em localidades com menos de cinco mil habitantes, e o quinto, Salvador, capital do estado baiano, tem 2.900.319 habitantes (IBGE, 2010).

O uso do AnaliseAr foi feito com a concessão desse direito por projetos desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energia e Ambiente (INCT E&A), por meio do seu grupo de pesquisa associado Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento em Química da Universidade Federal da Bahia, em função do Acordo de Cooperação Técnica celebrado entre estes e a Gestão Pública e Ambiental LTDA, empresa parceira da EDZA Planejamento, Consultoria e Informática, detentora da patente do AnaliseAr.

A Tabela 3 apresenta os níveis de concentração de 16 contaminantes determinados na atmosfera das referidas localidades no entorno da Baía de Todos os Santos, comparados com os limites legislados no Brasil e recomendações internacionais mais restritivas e em vigência.

Entre os resultados de concentrações dos contaminantes/poluentes exibidos na Tabela 3, podem ser destacados principalmente os níveis de

Tabela 2 - Validação em campo dos amostradores passivos dispostos no AnaliseAr.

Amostrador passivo	Método de validação (comparação)	Área de aplicação	Erro relativo (%)	Tempo de exposição (dias)	Referência
SO_2	Analisador contínuo	Industrial	9,5	7-28	Campos <i>et al.</i> (2010)
O_3			11	7-28	
NO_2			10	7-28	
NH_3			1,3-14	3-7	Lima (2011)
H_2S			19	7-14	Campos <i>et al.</i> (2010)
NOx		Urbana	2,6	7-14	Barbosa, Campos e Rocha (2022)
HCl	Tubos de difusão (denuder)	Urbana	15,9	5-14	Cruz <i>et al.</i> (2019)
HNO_3			15	5-14	
$HCOOH$			15	5-14	
CH_3COOH			18	5-14	
HCHO	Método de referência (EPA/TO - 11A)	Urbana	14	7-14	Santana <i>et al.</i> (2017)
CH_3CHO			9,8	7-14	
BTEX	Amostrador passivo disponível comercialmente (Radiello)	Urbana	15	14	Santana <i>et al.</i> (2018)

BTEX: benzeno, etilbenzeno, tolueno e xilenos.

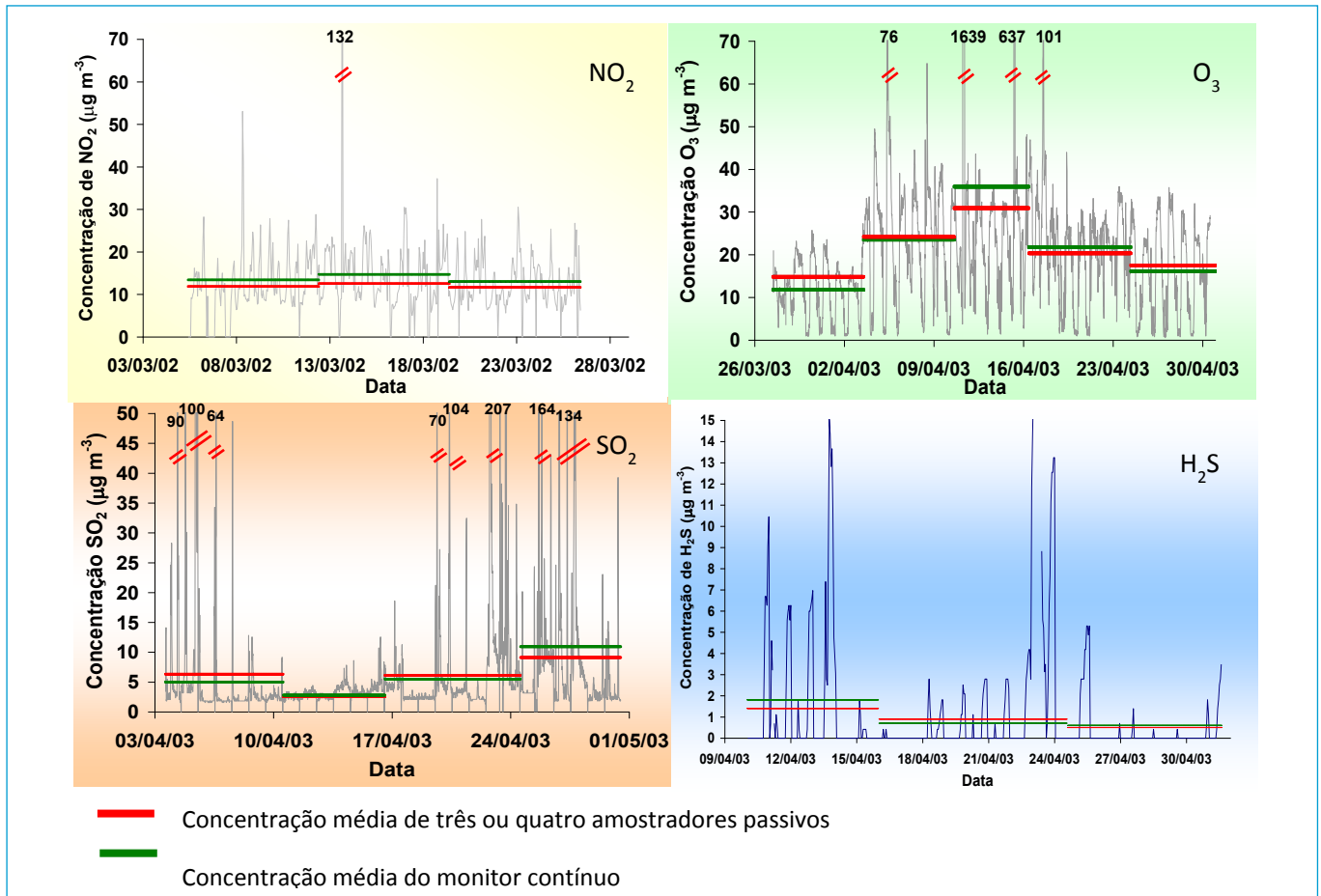


Figura 5 - Medidas de NO_2 , O_3 , SO_2 e H_2S realizadas simultaneamente usando amostradores passivos e monitores contínuos na área de influência do polo industrial de Camaçari, Bahia, Brasil.

benzeno, que é um dos compostos mais amplamente monitorados por causa do seu efeito cancerígeno, ultrapassando nas cinco localidades o limite recomendado pelo Ministério do Meio Ambiente de Ontário (OME, 2012), Canadá. O valor mais alto ocorreu em Madre de Deus, que, da mesma forma como São Francisco do Conde, tem população abaixo de 50 mil habitantes e sofre influência tanto veicular como industrial. Essas duas localidades podem receber emissões de atividades de exploração e produção de petróleo e gás de refinaria próxima, além do polo industrial de Camaçari. Formaldeído também se destacou na atmosfera de Salvador, ultrapassando o limite da Comissão do Texas sobre Qualidade Ambiental (TCEQ, 2016), o que pode ser justificado pelo grande volume de tráfego veicular na cidade. Dióxido de enxofre em São Francisco do Conde e ozônio em Madre de Deus ultrapassaram também os limites recomendados pela União Europeia (EU, 2008), Texas (TCEQ, 2016) e Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (NAAQS, 2016) para proteção a vegetação e ecossistemas naturais.

A precisão das medidas em triplicata para todos os analitos nos pontos amostrais foi adequada, com desvio padrão relativo variando entre 0,010 e 1,1%, de acordo com o limite recomendado para esse tipo de medida em ambientes externos (EU, 2008). Os resultados da Tabela 3 permitiram também calcular as taxas de amostragem (SR) para os diferentes gases coletados nos APs do modelo usado no *kit* AnaliseAr. Nessa tabela, os padrões

de qualidade sem referência ao tempo são anuais. As taxas foram calculadas usando a Equação 7, que considera a massa coletada (m), em μg , a concentração calculada para o gás na atmosfera (X), em $\mu\text{g cm}^{-3}$, e o tempo de exposição, em min (Tabela 4).

$$\text{SR} (\text{cm}^3 \text{min}^{-1}) = \frac{m}{X} \cdot t \quad (7)$$

Observa-se na Tabela 4 que as taxas de amostragem dos compostos BTEX são 10 vezes mais baixas em relação às taxas de amostragem dos outros compostos. Isso ocorre em função dos coeficientes de difusão dos referidos compostos, que também diferem de um fator de 10, o que justifica a necessidade de o tempo de exposição do AP para os BTEX ser o dobro da maioria dos demais (Tabela 2).

As Figuras 6 e 7 mostram o formato de apresentação/divulgação dos resultados na *web*, conforme o padrão usado pelo sistema AnaliseAr, com gráficos e pequeno texto sobre a qualidade do ar na rede de amostragem ou em cada ponto da rede isoladamente, podendo subsidiar ações de gestão ambiental, com vistas à conservação dos ecossistemas, previsão e mitigação de futuros impactos no ambiente e na saúde das comunidades do entorno da Baía de Todos os Santos.

Os resultados da aplicação do dispositivo AnaliseAr mostraram que o dispositivo de amostragem passiva fornece resultados com boa representação estatística, podendo ser utilizado para medidas ambientais em diferentes tipos de área, inclusive remota.

Tabela 3 - Concentrações atmosféricas de contaminantes/poluentes gasosos determinadas com o kit AnaliseAr.

Local	Concentração contaminantes/poluentes (µg m ⁻³)																			
	Convencionais				Nitrogenados				Carbonílicos				Carboxílicos				Compostos orgânicos voláteis			
	SO ₂	NO ₂	O ₃	HNO ₃	NH ₃	NO	NOx	CH ₃ COH	HCOH	CH ₃ COOH	HCOOH	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	o-Xileno	m, p-Xileno				
Madre de Deus	2,7	6,7	17	1,7	<11	0,31	6,7	2,1	2,8	1,4	1,2	1,7	2,7	1,0	0,90	1,70				
	± 0,23	± 0,15	± 1,4	± 0,48	-	± 0,21	± 0,39	± 0,40	± 0,93	± 0,33	± 0,030	± 0,040	± 0,060	± 0,010	± 0,030	± 0,070				
São Francisco do Conde	8,2	8,0	7,0	0,71	1,2	0,66	8,4	2,4	3,2	1,6	1,3	0,95	2,0	0,92	0,88	1,44				
	± 0,11	± 1,1	± 0,12	± 0,15	± 0,080	± 0,06	± 0,22	± 0,31	± 0,53	± 0,14	± 0,060	± 0,040	± 0,25	± 0,15	± 0,15	± 0,050				
Salvador	1,1	1,1	6,9	<0,28	1,7	1,0	1,2	3,2	4,9	2,6	7,7	0,87	1,4	0,68	0,80	1,35				
	± 0,17	± 0,70	± 0,15	-	± 0,50	± 0,11	± 0,39	± 0,53	± 0,46	± 0,66	± 0,020	± 0,030	± 0,060	± 0,040	± 0,030	± 0,23				
Itaparica	2,5	7,4	1,1	<0,28	<11	1,0	8,7	4,4	3,0	2,9	2,1	1,3	1,2	0,68	0,88	0,62				
	± 0,03	± 0,37	± 0,010	-	-	± 0,71	± 0,090	± 0,54	± 0,90	± 0,60	± 0,060	± 0,070	± 0,25	± 0,04	± 0,050	± 0,050				
Salinas das Margaridas	4,5	5,5	6,9	<0,28	<11	0,46	6,1	4,7	2,4	5,3	1,5	0,92	1,2	0,73	0,76	0,70				
	± 0,53	± 0,27	± 0,050	-	-	± 0,19	± 0,45	± 1,1	± 1,1	± 0,84	± 0,060	± 0,070	± 0,19	± 0,060	± 0,080	± 0,040				
Média	3,8	7,6	7,8	0,56	0,94	0,70	8,4	3,4	3,3	2,8	2,8	1,1	1,7	0,81	0,84	1,2				
Faixa	1,1-8,2	5,5-11	1,1-17	<0,28-17	<11-17	0,31-1	6,1-12	2,1-4,7	2,4-4,9	1,4-5,3	1,2-7,7	0,87-1,7	1,2-2,7	0,68-1	0,76-0,9	0,62-1,7				
Limite de quantificação	0,93	0,89	1,6	0,28	1,1	*	0,62	1,2	0,64	0,82	0,54	0,94	0,80	1	0,91	0,90				
Conama (2018)	40	60	140/8h	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Ministério do Meio Ambiente de Ontário, Canadá (2020)	104/h	200/24h	165/h	-	100/24h	-	-	500/24h	65/24h	-	500/24h	0,45	-	1000/24h	730/24h	730/24h				
Comissão do Texas sobre Qualidade Ambiental (TCEQ, 2016)	197/h	100	150/8h	50	92	-	-	45	3,3	25	9	4,5	171/s	570	180	180				
Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (2016)	197/h	100	150/8h	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
União Europeia (EU, 2008)	125/h ^a 20 ^b	40	120/8h	-	-	-	30 ^b	-	-	-	-	5	-	-	-	-				
Organização Mundial da Saúde (WHO, 2021)	40/24h	10	100/8h	-	-	-	-	-	-	-	-	1,7 ^c	-	-	-	-				

Conama: Conselho Nacional do Meio Ambiente; ^aconcentração calculada pela diferença entre NOx e NO₂; ^bproteção à saúde; ^cproteção à vegetação; ^dassociado ao risco de leucemia; 1/100 mil; s: semana.

Tabela 4 - Taxas de amostragem para os poluentes coletados nos amostradores passivos dispostos no *kit* AnaliseAr.

Contaminantes/poluentes	Taxa de amostragem a 22 e 30°C e 1 atm - APs AnaliseAr (cm ³ min ⁻¹)	Contaminante/poluente	Taxa de amostragem a 22 e 30°C e 1 atm - APs AnaliseAr (cm ³ min ⁻¹)
SO ₂	0,1951-0,2030	HNO ₃	0,1923-0,2003
O ₃	0,2539-0,2643	H ₂ S	0,2397-0,2496
NO ₂	0,2268-0,2361	HCOOH	0,2146-0,2233
NOx	0,2258-0,2346	CH ₃ COOH	0,1818-0,1887
NH ₃	0,3109-0,3235	Benzeno	0,01312-0,01366
HCHO	0,2562-0,2666	Tolueno	0,01193-0,01241
CH ₃ CHO	0,1939-0,2008	Etilbenzeno o,m,p-Xilenos	0,01101-0,01146
HCl	0,2576-0,2681		

*Faixa de temperatura nos períodos de amostragem: chuvoso e seco; AP: amostrador passivo.

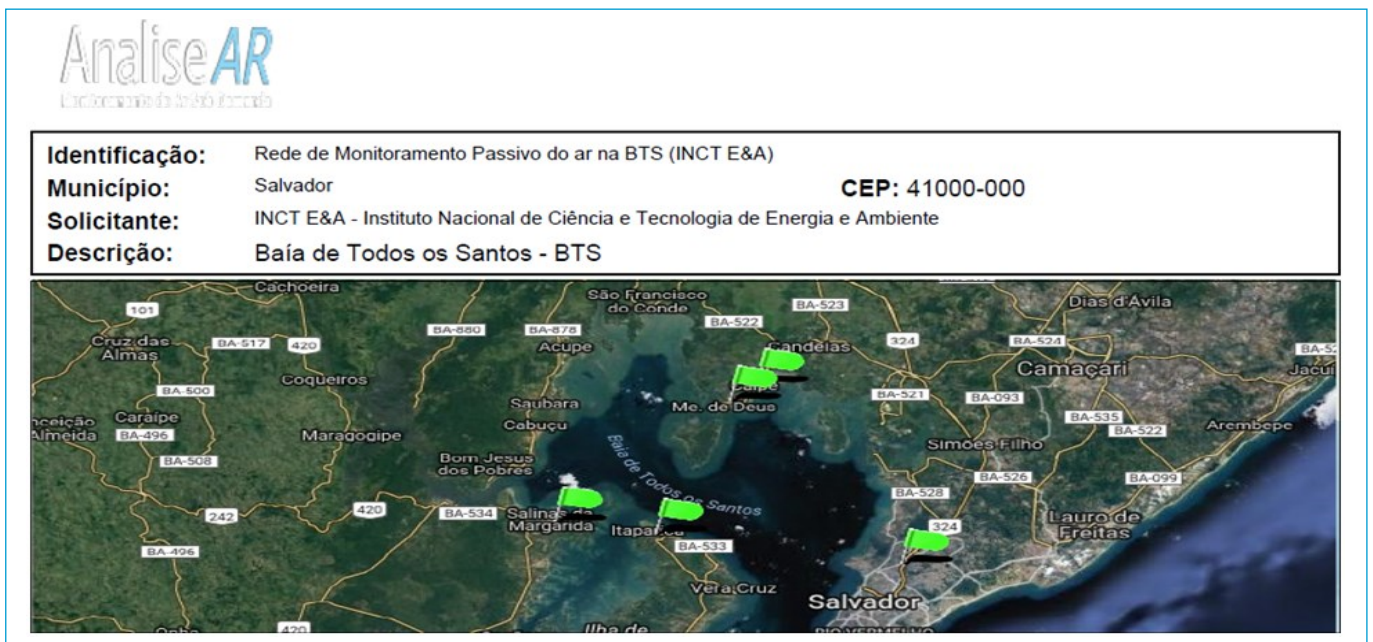


Figura 6 - Mapa apresentado no sistema AnaliseAr para a rede de monitoramento passivo do ar (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energia e Ambiente), na Baía de Todos os Santos.

CONCLUSÃO

O *kit* AnaliseAr é uma alternativa para monitoramento de gases e vapor na atmosfera, a baixo custo, de simples aplicação, possibilitando ainda a reutilização de todas as partes, exceto filtros e adsorventes usados. Os amostradores passivos que compõem o sistema AnaliseAr apresentam boa exatidão e precisão e podem ser usados tanto em áreas urbanas e industriais como rurais e remotas. Dessa forma, o dispositivo pode servir como ferramenta para a implantação/complementação de redes de monitoramento do ar.

A aplicação do AnaliseAr pode auxiliar no cumprimento e/ou adequação do art. 15 da Lei Federal brasileira nº 8.723/1993, conforme o qual órgãos ambientais nos âmbitos federal, estadual e municipal devem monitorar a qualidade do ar e fixar diretrizes e programas para seu controle, especialmente em cidades com mais de 500 mil habitantes, o que só ocorre hoje em pequeno número entre as cidades brasileiras.

O desenvolvimento de dispositivos voltados à avaliação da qualidade do ar contribui para o conhecimento mais amplo da composição química da atmosfera. Isso é extremamente importante, sobretudo porque permite a avaliação dos impactos da poluição sobre a saúde da população. Além disso, pode subsidiar o estabelecimento de novos padrões de qualidade do ar, em função de níveis significativos de poluentes tóxicos ainda não legislados no país que possam ser detectados.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Campos da Rocha, F.O.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Validação, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição; Campos, V.P.: Conceituação, Obtenção de Financiamento, Administração do Projeto, Visualização, Escrita — Revisão e Edição.

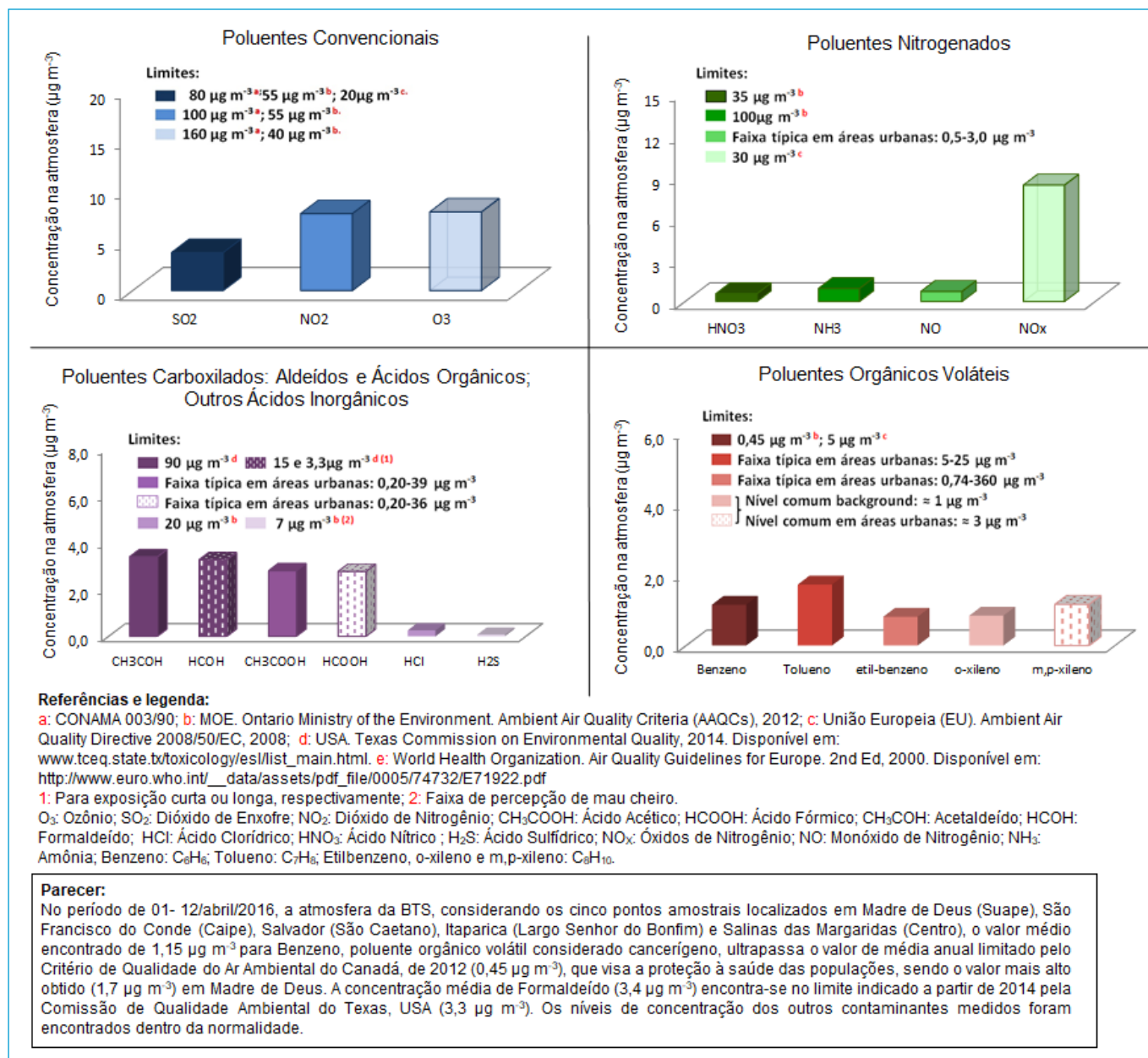


Figura 7 - Modelo de apresentação dos resultados no sistema AnáliseAr.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). *Resolução RDC nº 166*. Validação de métodos analíticos. Brasil: ANVISA, 2017. Disponível em: https://in.gov.br/materia/-/asset_publisher/KujrwOTZC2Mb/content/id/19194581/doi-2017-07-25-resolucao-rdc-n-166-de-24-de-julho-de-2017-19194412. Acesso em: 25 dez. 2022.

ALFOLDY, B.; MAHFOUZ, M.M.K.; YIGITERHAN, O.; SAFI, M.A.; ELNAIEM, A.E.; GIAMBERINI, S. BTEX, nitrogen oxides, ammonia and ozone concentrations at traffic influenced and background urban sites in an arid environment. *Atmospheric Pollution Research*, v. 10, n. 2, p. 445-454, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.08.009>

BARBOSA, J.L.; CAMPOS, V.P.; ROCHA, F.O.C. Desenvolvimento de amostrador passivo para óxidos de nitrogênio (NO_x) na atmosfera. *Revista Virtual de Química*, p.1-13, 2022. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20220132>

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 491/2018*. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Brasil, 2018. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=21/11/2018&jornal=515&pagina=155>. Acesso em: 24 fev. 2023.

BRASIL. Lei nº 8.723/1993. Dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências. Brasil, 1993.

Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8723.htm. Acesso em: 24 fev. 2023.

BUCZYNSKA, A.J.; KRATA, A.; STRANGER, M.; LOCATELI GODOI, A.F.; KONTOZOVA-DEUTSCH, V.; BENCS, L.; NAVEAU, I.; ROEKENS, E.; VAN GRIEKEN, R. Atmospheric BTEX-concentrations in an area with intensive street traffic. *Atmospheric Environment*, v. 43, n. 2, p. 311-318, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.071>

CAMEL, V.; CAUDE, M. Trace enrichment methods for the determination of organic pollutants in ambient air. *Journal of Chromatography A*, v. 710, n. 1, p. 3-19, 1995. [https://doi.org/10.1016/0021-9673\(95\)00080-7](https://doi.org/10.1016/0021-9673(95)00080-7)

CAMPOS, V.P.; CRUZ, L.P.; ALVES, E.M.; SANTOS, T.D.S.; SILVA, A.D.; SANTOS, A.C.; MATTOS, R.R. Monitoramento atmosférico passivo de SO₂, NO₂ e O₃ em áreas urbanas e de influência industrial como prática de química ambiental para alunos de graduação. *Química Nova*, v. 29, n. 4, p. 872-875, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000400042>

CAMPOS, V.P.; CRUZ, L.P.S.; GODOI, R.H.M.; GODOI, A.F.L.; TAVARES, T.M. Development and validation of passive samplers for atmospheric monitoring of SO₂, NO₂ e O₃ and H₂S in tropical areas. *Microchemical Journal*, v. 96, n. 1, p. 132-138, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2010.02.015>

CARMICHAEL, G.R.; FERM, M.; THONGBOONCHOO, N.; WOO, J.H.; CHAN, L.Y.; MURANO, K.; BILICI, E. Measurements of sulfur dioxide, ozone and ammonia concentrations in Asia, Africa, and South America using passive samplers. *Atmospheric Environment*, v. 37, n. 9-10, p. 1293-1308, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)01009-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)01009-9)

CASSINELLI, M.E.; HULL, R.D.; CUENDET, P.A. Performance of sulfur dioxide passive monitors. *American Industrial Hygiene Association Journal*, v. 46, n. 10, p. 599-608, 1985. <https://doi.org/10.1080/15298668591395391>

CRUZ, L.P.S.; CAMPOS, V.P. Amostragem passiva de poluentes atmosféricos. Aplicação ao SO₂. *Química Nova*, v. 25, n. 3, p. 406-411, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000300013>

CRUZ, L.P.S.; CAMPOS, V.P. Métodos de amostragem e análise para compostos reduzidos de enxofre atmosférico. *Química Nova*, v. 31, n. 5, p. 1180-1189, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000500047>

CRUZ, L.P.S.; CAMPOS, V.P.; NOVAES, J.A.P.; TAVARES, T.M. Laboratory validation of a passive sampler for SO₂ atmospheric monitoring. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 16, n. 1, p. 50-57, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532005000100008>

CRUZ, L.P.S.; CAMPOS, V.P.; SILVA, A.M.C.; TAVARES, T.M. A field evaluation of a SO₂ passive sampler in tropical industrial and urban air. *Atmospheric Environment*, v. 38, n. 37, p. 6425-6429, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.07.022>

CRUZ, L.P.S.; MOTA, E.; CAMPOS, V.; SANTANA, F.; LUZ, S.; SANTOS, D. Inorganic and organic acids in the atmosphere of the urban area of the city of Salvador, Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 30, n. 5, p. 904-914, 2019. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180227>

DE DONNO, A.; DE GIORGI, M.; BAGORDO, F.; GRASSI, T.; IDOLO, A.; SERIO, F.; MAPEC_LIFE STUDY GROUP. Health Risk Associated with Exposure to PM₁₀ and Benzene in Three Italian Towns. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 15, n. 8, p. 1672, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081672>

EUROPEAN UNION (EU). Directive 2008/50/EC of on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*, 2008.

Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=en>. Acesso em: 25 dez. 2022.

FERM, M.; SVANBERG, P.-A. Cost-efficient techniques for urban- and background measurements of SO₂ and NO₂. *Atmospheric Environment*, v. 32, n. 8, p. 1377-1381, 1998. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00170-2)

GÓRECKI, T.; NAMIEŚNIK, J. Passive sampling. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 21, n. 4, p. 276-291, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(02\)00407-7](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(02)00407-7)

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *IBGE cidades: Censo 2010*. IBGE, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 dez. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). *Orientação sobre validação de métodos analíticos: DOQ-CGCRE-008*. INMETRO, 2016. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/Cgcre/DOQ/DOQ-Cgcre-8_05.pdf. Acesso em: 25 dez. 2022.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). *Compendium of Chemical Terminology*. 2. ed. IUPAC, 1997. Disponível em: <https://old.iupac.org/publications/books/author/mcnaught.html>. Acesso em: 6 jul. 2022.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). Harmonized guidelines for single-laboratory validation of methods of analysis. *Pure Applied Chemistry*, v. 74, n. 5, p. 835-855, 2002.

KIROS, F.; SHAKYA, K.M.; RUPAKHETI, M.; REGMI, R.P.; MAHARJAN, R.; BYANJU, R.M.; NAJA, M.; MAHATA, K.; KATHAYAT, B.; PELTIER, R.E. Variability of anthropogenic gases: Nitrogen oxides, sulfur dioxide, ozone and ammonia in Kathmandu Valley, Nepal. *Aerosol and Air Quality Research*, v. 16, n. 12, p. 3088-3101, 2016. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.07.0445>

KOUTRAKIS, P.; WOLFSON, J.M.; BUNYAVIROCH, A.; FROEHLICH, S.E.; HIRANO, K.; MULIK, J.D. Measurement of ambient ozone using a nitrite-coated filter. *Analytical Chemistry*, v. 65, n. 3, p. 209-214, 1993. <https://doi.org/10.1021/ac00051a004>

KROCHMAL, D.; KALINA, A. A method of nitrogen dioxide and sulphur dioxide determination in ambient air by use of passive samplers and ion chromatography. *Atmospheric Environment*, v. 31, n. 20, p. 3473-3479, 1997. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00154-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00154-4)

KRUPA, S.V.; LEGGE, A.H. Passive sampling of ambient, gaseous air pollutants: an assessment from an ecological perspective. *Environmental Pollution*, v. 107, n. 1, p. 31-45, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00154-2](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00154-2)

LAN, T.T.N.; NISHIMURA, R.; TSUJINO, Y.; IMAMURA, K.; WARASHINA, M.; HOANG, N.T.; MAED, Y. Atmospheric concentrations of sulfur dioxide, nitrogen oxides, ammonia, hydrogen chloride, nitric acid, formic and acetic acids in the south of Vietnam measured by the passive sampling method. *Analytical Sciences*, v. 20, n. 1, p. 213-217, 2004. <https://doi.org/10.2116/analsci.20.213>

LIMA, M.A.O. *Desenvolvimento de amostrador passivo para amônia na atmosfera*. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

LIN, Y.; QIU, X.; MA, Y.; MA, J.; ZHENG, M.; SHAO, M. Concentrations and spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and nitrated PAHs (NPAHs) in the atmosphere of North China, and the transformation from PAHs to NPAHs. *Environmental Pollution*, v. 196, p. 164-170, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.10.005>

- MARĆ, M.; NAMIEŚNIK, J.; ZABIEGAŁA, B. BTEX concentration levels in urban air in the area of the Tri-City agglomeration (Gdansk, Gdynia, Sopot). Poland. *Air Quality, Atmosphere e Health*, v. 7, n. 4, p. 489-504, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11869-014-0247-x>
- MELYMUK, L.; BOHLIN-NIZZETTO, P.; PROKEŠ, R.; KUKUČKA, P.; KLÁNOVÁ, J. Sampling artifacts in active air sampling of semivolatile organic contaminants: Comparing theoretical and measured artifacts and evaluating implications for monitoring networks. *Environmental Pollution*, v. 217, p. 97-106, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.015>
- MILLER, D.D.; BAJRACHARYA, A.; DICKINSON, G.N.; DURBIN, T.A.; MCGARRY, J.K.P.; MOSER, E.P.; NUÑEZ, L.A.; PUKKILA, E.J.; SCOTT, P.S.; SUTTON, P.J.; JOHNSTON, N.A.C. Diffusive uptake rates for passive air sampling: Application to volatile organic compound exposure during FIREX-AQ campaign. *Chemosphere*, v. 287, parte 1, 131808, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131808>
- NATIONAL AMBIENT AIR QUALITY STANDARDS (NAAQS). Table NAAQS. *Criteria Air Pollutants*, n. 1, p. 1-4, 2016. Disponível em: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>. Acesso em: 25 dez. 2022.
- NELSON, G. *Gas Mixtures: preparation and control*. Routledge, 1992.
- ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT (OME). *Standards Development Branch Ontario Ministry of the Environment*. OME, 2012. Disponível em: <https://www.ontario.ca/page/ontarios-ambient-air-quality-criteria>. Acesso em: 25 dez. 2022.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). *The economic consequences of outdoor air pollution: policy highlights*. OECD, 2016. <https://doi.org/10.1787/9789264257474-en>
- PALMES, E.D.; GUNNISON, A.F. Personal monitoring device for gaseous contaminants. *American Industrial Hygiene Association Journal*, v. 34, n. 2, p. 78-81, 1973. <https://doi.org/10.1080/0002889738506810>
- PALMES, E.D.; LINDENBOOM, R.H. Ohm's law, Fick's law, and diffusion samplers for gases. *Analytical Chemistry*, v. 51, n. 14, p. 2400-2401, 1979. <https://doi.org/10.1021/ac50050a026>
- SANTANA, F.O.; CAMPOS, V.P.; BARBOSA, J.L.; BRITO, A.V.S. Contaminants in the gas phase, in the atmosphere of the Todos os Santos Bay - Ba. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 41., 2018. Anais [...]. Foz do Iguaçu, 2018.
- SANTANA, F.O.; CAMPOS, V.P.; CRUZ, L.P.S.; LUZ, S.R. Formaldehyde and acetaldehyde in the atmosphere of Salvador-Ba, Brazil, using passive sampling. *Microchemical Journal*, v. 134, p. 78-86, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.04.032>
- SANTANA, F.O.; CAMPOS, V.P.; SANTOS, I.F.; CRUZ, L.P.S.; BRITO, A.V.S. Seasonal quimiometric study of formaldehyde and acetaldehyde atmospheric levels and health risk assessment, in urban areas of Salvador-Bahia, Brazil. *Microchemical Journal*, v. 147, p. 524-531, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.03.069>
- SEETHAPATHY, S.; GÓRECKI, T.; LI, X. Passive sampling in environmental analysis. *Journal of Chromatography A*, v. 1184, n. 1-2, p. 234-253, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.07.070>
- SENATSWERWALTUNG FÜR UMWELT, MOBILITÄT, VERBRAUCHER- UND KLIMASCHUTZ (SUVK). *Luftdaten-Archiv: Berichte und ergänzende Daten*. 2018. Disponível em: <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/luft/luftqualitaet/luftdaten-archiv/>. Acesso em: 25 dez. 2022.
- SILVA, A.F.; VIEIRA, C.A. Aspectos da poluição atmosférica: uma reflexão sobre a qualidade do ar nas cidades brasileiras. *Ciência e Sustentabilidade*, v. 3, n. 1, p. 166-189, 2017. <https://doi.org/10.33809/2447-4606.312017166-189>
- SOUZA, P.; FRANCISCO, K.; CARDOSO, A. Desenvolvimento de amostrador passivo sensível para monitoramento de poluição atmosférica por dióxido de nitrogênio. *Química Nova*, v. 40, p. 1233-1237, 2017. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170117>
- TEXAS COMMISSION ON ENVIRONMENTAL QUALITY (TCEQ). *Effects screening levels*. TCEQ, 2016. Disponível em: https://www.tceq.texas.gov/toxicology/esl/list_main.html. Acesso em: 25 dez. 2022.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *WHO global air quality guidelines*. WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>. Acesso em: 25 dez. 2022.
- ZABIEGAŁA, B.; KOT-WASIK, A.; URBANOWICZ, M.; NAMIEŚNIK, J. Passive sampling as a tool for obtaining reliable analytical information in environmental quality monitoring. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 396, p. 273-296, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-3244-4>
- ZHOU, J.; SMITH, S. Measurement of ozone concentrations in ambient air using a badge-type passive monitor. *Journal of the Air e Waste Management Association*, v. 47, n. 6, p. 697-703, 1997. <https://doi.org/10.1080/10473289199710463932>