

Comparação entre técnicas para investigação ambiental da intrusão de vapores do solo – Estudo de caso: São Paulo – SP

Comparison of techniques for vapor intrusion environmental investigation – Case study: São Paulo – Brazil

Luciano de Freitas Silvino¹, Ana Cristina Malheiros Gonçalves Carvalho²

¹Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, lucianosilvino88@gmail.com

²Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, anacris@puc-rio.br

Recebido:

5 de outubro de 2025

Recebido no formato de revisão:

5 de março de 2026

Aceito:

5 de abril de 2026

Disponível online:

8 de junho de 2026

Seção:

Artigos

Palavras-chave:

Summa Canister.

Monitoramento Automático

Contínuo.

TO-15.

TO-14A.

Intrusão de vapores.

Keywords:

Summa Canister.

Continuous Automatic Monitoring.

TO-15.

TO-14A.

Vapor intrusion.

<https://doi.org/10.14295/ras.v40i2.30372>



RESUMO

Este artigo tem como objetivo interpretar e comparar os resultados obtidos por duas técnicas de amostragem de vapores do solo para utilização nas etapas de diagnóstico ambiental em uma área contaminada por etenos clorados na água subterrânea. As duas técnicas abordadas neste estudo são a *Summa Canister* e o Monitoramento Automático Contínuo. O *Summa Canister* é um recipiente de aço inoxidável com pressão negativa que é acoplado através de uma tubulação no poço de monitoramento. Após a coleta da amostra, o recipiente é enviado para o laboratório para análise pelo método USEPA TO-15. O monitoramento automático contínuo é uma técnica na qual tubulações são acopladas aos poços de monitoramento de vapor do solo e submetidas à aplicação de pressão negativa. A amostra é succionada do ponto de amostragem para a válvula de injeção do cromatógrafo no laboratório móvel e analisada pelo método USEPA TO-14A. Os resultados da técnica por *Summa Canister* são expressos de forma pontual no tempo, ou seja, uma concentração por ponto amostrado representando um período de tempo. A técnica de monitoramento automático contínuo traz resultados de concentração em tempo real durante todo período de amostragem. Conclui-se que os resultados fornecidos pelo monitoramento automático contínuo permitem um diagnóstico mais assertivo dos processos de intrusão de vapores na área de estudo. A análise de tendências dos resultados aliado a possíveis interferências externas como as variáveis ambientais permite um gerenciamento da contaminação mais adequado, facilitando a tomada de decisão.

ABSTRACT

This article aims to compare the results obtained by two soil vapor sampling techniques for use in the stages of environmental diagnosis in an area contaminated by chlorinated ethynes in groundwater. The two techniques covered in this study are Summa Canister and Continuous Automatic Monitoring. The Summa Canister is a stainless-steel container with negative pressure that is coupled through a pipe in the monitoring well. After sample collection, the container is sent to the laboratory for analysis using the USEPA TO-15 method. Continuous automatic monitoring is a technique in which pipes are coupled to the soil vapor monitoring wells and subjected to the application of negative pressure. The sample is sucked from the sampling point to the chromatograph injection valve in the mobile laboratory and analyzed by the USEPA TO-14A method. The results obtained using the Summa Canister technique are expressed as point-in-time measurements, that is, a single concentration per sampling point representing a specific time period. The continuous automatic monitoring technique brings concentration results in real time throughout the sampling period. It is concluded that the results provided by continuous automatic monitoring allow a more assertive diagnosis of the processes of vapor intrusion in the study area. The trend analysis of the results combined with possible external interference such as environmental variables allows more appropriate contamination management, facilitating decision making.

1. INTRODUÇÃO

A contaminação ambiental pode estar presente nos meios físicos: ar, solo, água e biota. Ao se identificar uma área contaminada, inicia-se o processo de gerenciamento que tem como objetivo minimizar os riscos aos quais estão sujeitos à população e o meio ambiente. Esse processo ocorre por meio de estratégia constituída por etapas sequenciais, nas quais as informações obtidas em cada etapa são a base para a execução da etapa posterior.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, uma área contaminada é definida como aquela que contenha quantidades ou concentrações de quaisquer substâncias ou resíduos em condições que causem ou possam causar danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger, que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural (Brasil, 2019).

Dentre as etapas está a de diagnóstico na qual varia o tipo de abordagem a depender do meio físico contaminado. Para o diagnóstico, atividades investigativas são realizadas com coleta de amostras no meio físico. Na investigação da intrusão de vapores são instalados poços de monitoramento na profundidade desejada, preferencialmente logo abaixo do piso.

Existem diversos tipos de técnicas para coleta de amostras de vapores do solo, sendo os principais: *Summa Canisters*, *Tedlar Bags*, tubos com materiais adsorventes, seringas e cilindros de vidro. Atualmente, a técnica mais empregada para amostragem é a *Summa Canister*, cujo objetivo é a compreensão da magnitude da contaminação em termos de concentração e delimitação na subsuperfície. No entanto, uma nova técnica de monitoramento automático contínuo está disponível no mercado com a premissa de permitir uma avaliação mais assertiva dos processos de intrusão de vapores do solo.

No Brasil, a Companhia Ambiental do estado de São Paulo (CETESB) foi pioneira na avaliação da via de exposição por intrusão de vapores. Em 2009, a diretriz (nº. 263/2009) incluiu a avaliação do processo de intrusão de vapores na etapa de investigação detalhada e plano de intervenção.

Este artigo tem como objetivo interpretar e comparar os resultados obtidos por duas técnicas de amostragem de vapores do solo, aplicadas às etapas de diagnóstico ambiental em um estudo de caso de área contaminada por etenos clorados na água subterrânea, localizada no município de São Paulo (SP). As técnicas avaliadas neste estudo são a amostragem por *Summa Canister* e o Monitoramento Automático Contínuo.

2. GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS

Para o gerenciamento de uma área contaminada adotam-se medidas que assegurem o conhecimento das características dessas áreas e dos impactos por ela causados, proporcionando os instrumentos necessários à tomada de decisão quanto às formas de intervenção mais adequadas (Brasil, 2019).

A etapa de diagnóstico é um tipo de abordagem técnica que permite a coleta de informações as características e impactos da área, no entanto, variações podem ocorrer devido às condições do meio físico contaminado. Para o presente estudo, optou-se pelo processo de investigação dos vapores do solo derivados da contaminação por etenos clorados na água subterrânea.

No Brasil, a Companhia Ambiental do estado de São Paulo (CETESB) foi pioneira na avaliação da via de exposição por intrusão de vapores. Em 2009 na diretriz (nº. 263/2009) a avaliação do processo de intrusão de vapores foi incluída na execução da investigação detalhada e no plano de intervenção de postos e sistemas retalhistas de combustíveis (Postos de Abastecimento). Sendo assim, técnicas de investigação dos vapores ou ar do solo vêm sendo realizadas para etapas de diagnóstico ambiental.

Diversas informações devem ser coletadas para a realização de um diagnóstico apropriado da via de exposição por intrusão de vapores. A USEPA (2015) recomenda que além das concentrações do vapor do solo, outras variáveis devem ser obtidas para a etapa de diagnóstico ambiental. Para avaliação do processo de intrusão de vapores algumas variáveis ambientais podem influenciar significativamente a coleta de amostras e interpretação dos resultados.

3. VARIÁVEIS AMBIENTAIS

3.1. Solo

Para a investigação da intrusão de vapores em ambientes fechados utiliza-se parâmetros físicos e químicos que podem ser obtidos por amostras de solo como: porosidade, umidade, densidade, condutividade hidráulica em meio poroso e fração orgânica de carbono. Segundo Gouvea Júnior *et al.* (2016), técnicas investigativas usadas na geotecnia estão sendo aplicadas para o refinamento do modelo conceitual da área com dados empíricos.

A obtenção desses parâmetros permite uma análise mais fundamentada, visto que materiais geológicos podem afetar a mobilidade de vapores orgânicos da fonte de contaminação até o ar ambiente. Estes materiais formam barreiras físicas – como a camada com granulometria fina –, caminhos preferenciais e podem influenciar o regime do fluxo de vapor transportado.

3.2. Transporte de Massa em meio poroso não saturado

O meio poroso não saturado é conhecido como zona vadosa e compreende a extensão da franja capilar até a linha de superfície do solo. Esta zona diferencia-se da zona saturada por possuir as poro pressões negativas e consequente condutividade hidráulica menor.

Os principais mecanismos de transporte de massa em meio poroso não saturado são: difusão, advecção e a dispersão mecânica. São estes os mecanismos que proporcionam a intrusão de vapores. Segundo Gouvêa Júnior, Bertolo e Hart (2018), a intrusão de vapores do solo é um processo definido pela migração de contaminantes em fase volátil desde uma fonte de contaminação existente em subsuperfície para o interior de edificações.

A difusão é um mecanismo dirigido por gradientes de concentração, da região de maior concentração para a de menor concentração. Segundo Ma *et al.* (2020), a difusão na fase gasosa através de solos com poros interconectados e preenchidos por ar é, em geral, considerada o mecanismo físico de transporte dominante na zona vadosa, influenciando o transporte de compostos orgânicos voláteis por essa zona.

A volatilização de compostos orgânicos ocorre principalmente a partir da água e da fase livre. A Lei de Henry descreve a partição de um composto orgânico entre as fases aquosa e gasosa, para soluções com concentrações baixas (Milani, 2017). A volatilização é transferência de massa de um composto orgânico para a fase gasosa, usualmente controlada pela partição em equilíbrio entre a fase aquosa e o ar (Lei de Henry) e por resistências cinéticas associadas ao transporte no meio poroso. No solo, o contaminante pode estar distribuído entre a fase aquosa (dissolvido), a fase sólida (sorvido à matriz) e a fase gasosa (vapor do solo), de modo que o equilíbrio de partição tende a resultar em concentrações distintas em cada fase, conforme as propriedades físico-químicas do composto e as condições do meio físico. A pressão de vapor é uma propriedade determinante porque expressa a tendência do composto em sustentar concentração na fase gasosa e, em conjunto com a constante de Henry, influencia diretamente a fração que migra para vapor sob condições ambientais.

O fenômeno da advecção é definido como o processo de transporte de espécies químicas devido ao movimento preferencial do fluido, ao longo do escoamento. Segundo Gouvea Júnior *et al.* (2016), o fluxo advectivo pode estar relacionado a gradientes de temperatura, gradientes de pressão e a diferenças de densidade. A advecção tem sido associada a flutuações da pressão barométrica e à produção de gases biogênicos decorrente da biodegradação metanogênica.

O processo de dispersão mecânica ocorre quando há interação entre o soluto em movimento e as estruturas sólidas do meio poroso. As equações para o cálculo da dispersão atmosférica requerem informações sobre: as taxas de emissão ou fluxo de vapores e partículas subsuperficiais; velocidade e direção do vento; fatores de dispersão lateral e vertical; características de subsuperfície; e altura da zona de mistura (Gouvea Júnior *et al.*, 2016).

3.3. Condições meteorológicas

Segundo Citychlor (2013), as condições meteorológicas têm impacto relevante na transferência de contaminantes; recomenda-se fortemente monitorar as pressões (de vapor do solo na subsuperfície, pressão interna da edificação

e a pressão atmosférica), temperatura (ambientes internos e externos das edificações), velocidade do vento e precipitação durante toda a campanha de amostragem, inclusive por alguns dias antes e depois.

Segundo a USEPA (2015), variações no diferencial de pressão (diferença entre a pressão do ar no interior de uma edificação e a pressão do ambiente subsuperficial ou do ar ambiente) podem ser esperadas devido aos seguintes fatores: período do dia, sazonalidade da temperatura ambiente, variações na pressão do ar ambiente, mudanças na direção e velocidade do vento.

4. METODOLOGIA

4.1. Estudo de caso

O presente trabalho teve como objetivo principal comparar os resultados obtidos a partir de duas técnicas de amostragem de vapores do solo para avaliação da intrusão de vapores mais assertiva. Os estudos foram conduzidos em uma área que no passado foi utilizada por empresas de fabricação de peças e acessórios para equipamentos eletrônicos. A área de estudo está localizada no município de São Paulo - SP, bairro Santo Amaro, e possui uma área total de 12.765,54 m². A Figura 1 apresenta a localização da área.

As atividades industriais realizadas no passado na área geraram impactos na água subterrânea com a contaminação por etenos clorados. A investigação de vapores oriundos do solo foi iniciada no ano de 2016 com a utilização de métodos de amostragem pontuais.

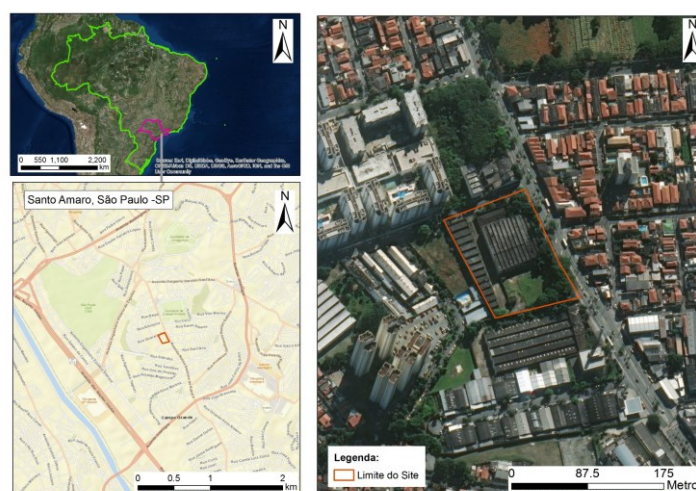


Figura 1. Localização da área.

A área teve uso pretérito de uma empresa de telecomunicações. As matérias primas manuseadas na área eram o álcool etílico, álcool isopropílico, fluxo para soldagem, óleo protetor para soldagem, vernizes, solventes para fluxos e querosene para limpeza. Atualmente, o imóvel encontra-se sem atividades comerciais ou industriais e os galpões encontram-se vazios.

4.2. Investigação da intrusão de vapores

Os estudos ambientais iniciaram-se em 2007 na área, devido a uma solicitação à CETESB para alteração do uso da propriedade. Durante as investigações ambientais identificou-se que os principais contaminantes na água subterrânea eram os compostos orgânicos voláteis, principalmente os etenos clorados (Tetracloroetano e Tricloroetano). A partir desta observação, foram solicitadas avaliações da intrusão de vapores do solo atribuídos à contaminação da área. Neste artigo serão apresentadas duas técnicas utilizadas na área de estudo e suas respectivas metodologias de análise laboratorial.

Considerando a relevância dos compostos identificados na área, torna-se importante compreender suas características físico-químicas e seu comportamento no meio ambiente. Os etenos clorados são substâncias químicas amplamente utilizadas como solventes industriais e em produtos de limpeza, sendo classificados de

acordo com o número e a posição dos átomos de cloro em sua estrutura molecular. Processos naturais do meio físico favorecem o transporte dessas substâncias para a fase vapor, possibilitando sua migração para o ar ambiente.

Existem diversas técnicas para coleta de amostras de vapores oriundos da subsuperfície, sendo as principais: *Summa Canisters*, *Tedlar Bags*, tubos com materiais adsorventes, seringas e cilindros de vidro. A técnica mais apropriada deve ser selecionada de acordo com o objetivo de investigação.

4.2.1. Amostragem por *Summa Canister* – USEPA TO-15

Summa Canister é um recipiente de aço inoxidável com volumes variando entre 400 ml e 6 litros. Segundo Citychlor (2013), o uso do *Summa Canister* é recomendado quando são esperadas concentrações extremas – altas e baixas – sendo capaz de eliminar limites analíticos.

Para a amostragem, o laboratório envia o *Summa Canister* esterilizado e com pressão negativa. O controlador de fluxo acoplado no recipiente é aberto, com a vazão calibrada em laboratório, e o vapor do solo é conduzido para o interior do mesmo devido à pressão negativa. Ao final do tempo de amostragem, o controlador de fluxo é fechado e o recipiente enviado para análise laboratorial.

Entre 2016 e 2018, nove poços de monitoramento de vapores do solo foram amostrados com *Summa Canister*. A duração da amostragem depende da vazão do controlador e do volume do recipiente. Em geral, a amostragem de ar ambiente tem durações entre 1 e 24 horas. Para ar do solo a USEPA recomenda uma vazão de sucção máximo de aproximadamente 200 mL/min Citychlor (2013). Na presente amostragem a duração foi de aproximadamente cinco minutos para 1 Litro de amostra, com vazão de 200ml/min.

Em laboratório, a amostra é analisada seguindo o protocolo USEPA TO-15 através de cromatografia gasosa e espectrometria de massa (GC-MS). As amostras coletadas nesse projeto foram analisadas para tetracloroetano e tricloroetano. A localização dos poços é apresentada na Figura 2.

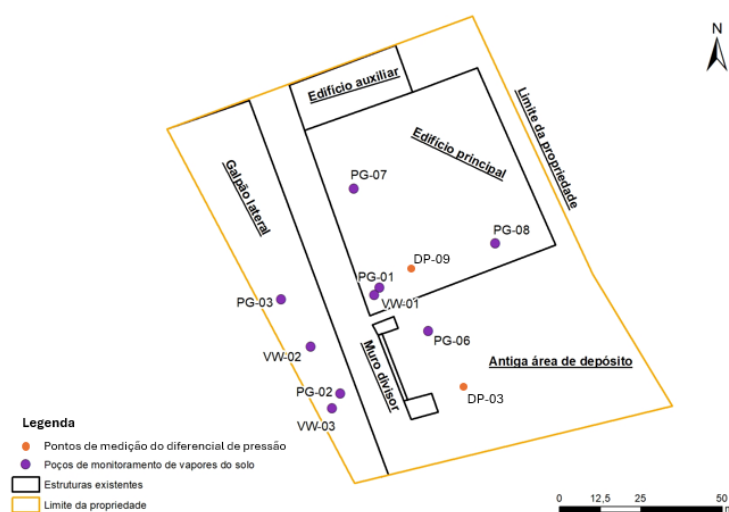


Figura 2. Malha de poços de monitoramento de vapores.

4.2.2. Monitoramento automático contínuo – USEPA TO-14A

Em 2019, utilizou-se o monitoramento automático contínuo para avaliação dos processos de intrusão de vapores na área. Foram analisadas somente as concentrações de tetracloroetano e tricloroetano pelo método TO-14A nos mesmos nove poços.

Para a realização do monitoramento automático contínuo é necessário um laboratório móvel no qual os poços de vapor de solo possam ser acoplados diretamente, através de tubulação inerte (tubos de Nylon de 1/8"), ao cromatógrafo gasoso, marca SRI, modelo 8610A, com detector de captura de elétrons (ECD).

Para a coleta das amostras, cada uma das tubulações de amostragem é submetida à aplicação de pressão negativa, de maneira que a amostra seja succionada do poço de monitoramento para a válvula de injeção do GC, em rotinas sequenciais de sucção, injeção e análise. Os resultados analíticos de cada um dos pontos amostrados são armazenados em um banco de dados na plataforma *web-cloud*.

Variáveis meteorológicas como temperatura do ar, pressão barométrica (ou atmosférica), direção do vento e diferencial de pressão são monitoradas ao mesmo tempo.

4.3. Método Analítico

Para a análise laboratorial diversos métodos analíticos para determinação de compostos orgânicos voláteis presentes no vapor do solo foram definidos pela Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos da América (USEPA). A seleção do método depende de diversos fatores, tais como: requerimentos técnicos exigidos pelo órgão ambiental, composto de interesse, limites de detecção, certificação laboratorial, entre outros. Os métodos de análise laboratorial mais utilizados são: TO-14A, TO-15, TO-17.

No presente estudo serão aplicados somente os métodos TO-14A, TO-15. Segundo a USEPA (1999), as principais diferenças entre os métodos TO-15 e TO-14A consistem no gerenciamento de água, no método de concentração da amostra e no tipo de detectores empregados.

O método TO-14A contempla o uso de diversos detectores, como a espectrometria de massas, ionização de chama, fotoionização ou captura de elétrons. Já o método TO-15 contempla apenas o uso de espectrometria de massas como sistema de detecção e estabelece critérios mínimos de qualidade que devem ser atingidos (Silva *et al.*, 2016).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados – *Summa Canister*

Os resultados das investigações realizadas no local de estudo para os compostos tetracloroetano e tricloroetano são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados de tetracloroetano e tricloroetano ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtidos pelo método TO-15

Resultados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) método TO-15			
Poço	Data	Tetracloroetano ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tricloroetano ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PG-01	02/12/2016	72	<LQ (1,8)
PG-02	02/12/2016	3000	2000
PG-03	02/12/2016	19	3,7
PG-06	01/12/2016	880	230
PG-07	22/03/2017	400	<LQ (1,8)
PG-08	22/03/2017	24	<LQ (1,8)
VW-01	15/06/2018	<LQ (170)	<LQ (130)
VW-02	15/06/2018	<LQ (7,7)	<LQ (6,1)
VW-03	15/06/2018	271	<LQ (6,7)

Legenda: < LQ = menor que o limite de quantificação.

A partir dos resultados, é possível observar que o composto tetracloroetano foi detectado na maioria dos poços diferentemente para o composto tricloroetano. O PG-02 foi o poço que apresentou as concentrações mais elevadas para ambos compostos.

5.2. Resultados do Monitoramento automático contínuo

O monitoramento automático contínuo teve início no dia 10 de maio de 2019 às 19 horas e 14min e foi concluído no dia 16 de maio de 2019 às 14 horas e 58min. O tempo entre a injeção e análise de cada um dos poços de monitoramento foi de 7 minutos. A Tabela 2 apresenta os resultados máximos obtidos no monitoramento automático contínuo.

Tabela 2 – Resultados máximos para tetracloroeteno e tricloroeteno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nos poços de monitoramento de vapores do solo pelo método de monitoramento automático contínuo

Resultados históricos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) método TO-14				
Poço	Data	Tetracloroeteno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Data	Tricloroeteno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PG-01	14/5/19 13:19	11,94	12/5/19 9:02	2,77
PG-02	14/5/19 15:53	13,21	11/5/19 9:28	4,4
PG-03	11/5/19 18:27	13,29	11/5/19 20:19	9,82
PG-06	16/5/19 14:58	17,28	16/5/19 14:58	35,72
PG-07	14/5/19 17:17	14,48	12/5/19 3:40	2,64
PG-08	14/5/19 14:43	13,51	12/5/19 6:42	2,57
VW-01	14/5/19 2:13	13,48	11/5/19 20:05	2,07
VW-02	12/5/19 15:13	11,33	11/5/19 20:33	3,43
VW-03	14/5/19 16:21	15,59	12/5/19 2:44	6,14

Legenda: < LQ = menor que o limite de quantificação.

Para tetracloroeteno, observou-se uma amplitude de concentração de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (limite de quantificação) a $17,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No Gráfico 1 observa-se a variabilidade diária das concentrações do tetracloroeteno nos poços monitorados. Já para o tricloroeteno, a amplitude foi de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (limite de quantificação) a $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e no Gráfico 2 observa-se a variabilidade diária das concentrações do tricloroeteno nos poços monitorados.

Concentração de tetracloroeteno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

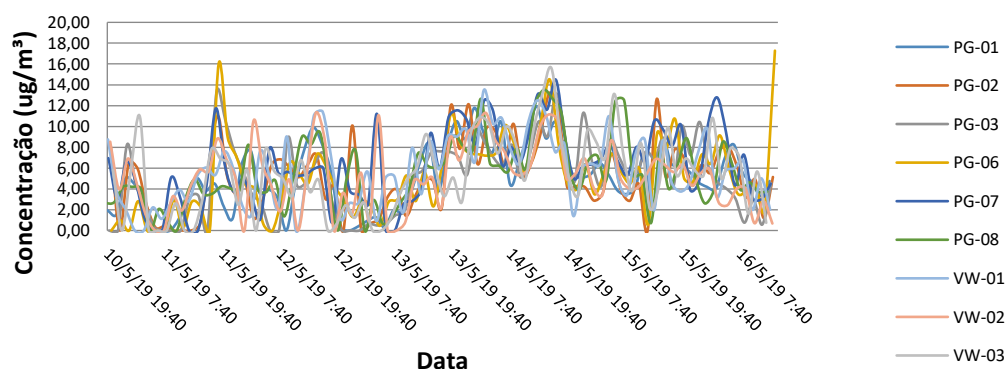


Gráfico 1. Variabilidade diária das concentrações do tetracloroeteno nos poços monitorados.

Concentração de tricloroeteno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

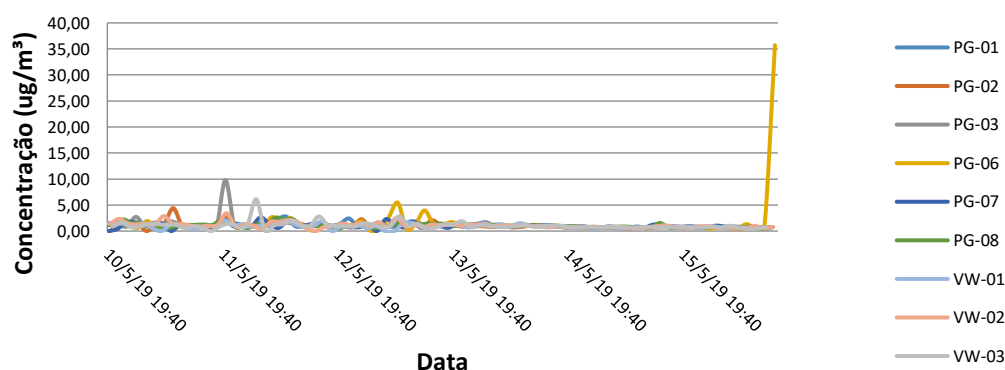


Gráfico 2. Variabilidade diária das concentrações do tricloroeteno nos poços monitorados.

Na área de estudo, foram monitorados dois pontos de controle (DP-03 e DP-09) para os seguintes parâmetros: pressão barométrica, temperatura e diferencial de pressão. O diferencial de pressão do DP-03 foi medido através de um sensor de pressão conectado no ponto PG-06 e o do DP-09 conectado no ponto VW-01. Esses parâmetros foram comparados aos obtidos na estação meteorológica do aeroporto de Congonhas.

O Gráfico 3 apresenta a pressão barométrica dos dois pontos dentro da área de estudo e da estação do aeroporto de Congonhas em São Paulo.

Pressão Barométrica (m Bar)

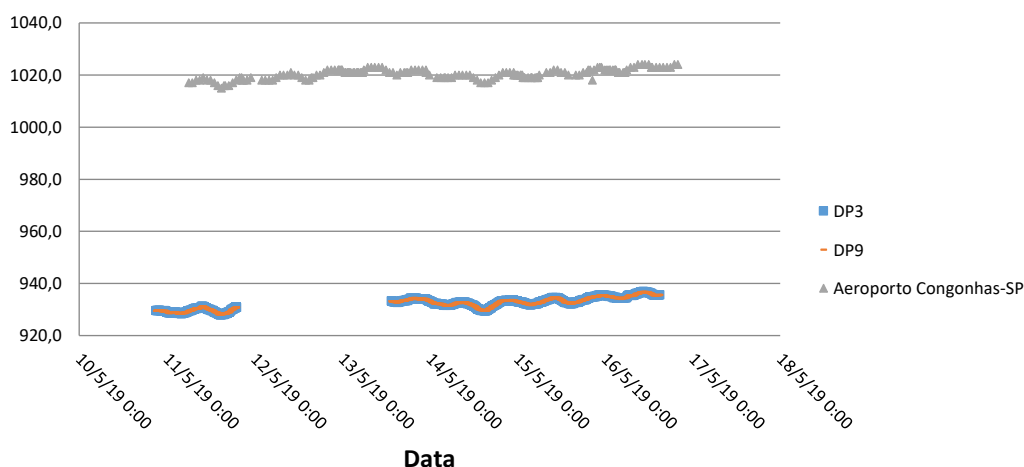


Gráfico 3. Pressão barométrica (m Bar) dentro da área de estudo e na estação meteorológica do aeroporto de Congonhas-SP.

Observa-se que a pressão barométrica na área de estudo para os dois pontos (DP-03 e DP-09) não tiveram variações entre si. Ao comparar com a medição realizada pela estação meteorológica do aeroporto de Congonhas, em São Paulo, observou-se uma diferença média de 90 m Bar. Nos dias 12 e 13 de maio de 2019 não foram monitorados os parâmetros meteorológicos na área de estudo.

Conforme apresentado no Gráfico 4, observa-se que nos dois pontos da área de estudo (DP-03 e DP-09) e na estação meteorológica do aeroporto de Congonhas, a temperatura sofreu pequenas variações entre si, no entanto, a tendência dos dados permanece a mesma.

Temperatura (°C)

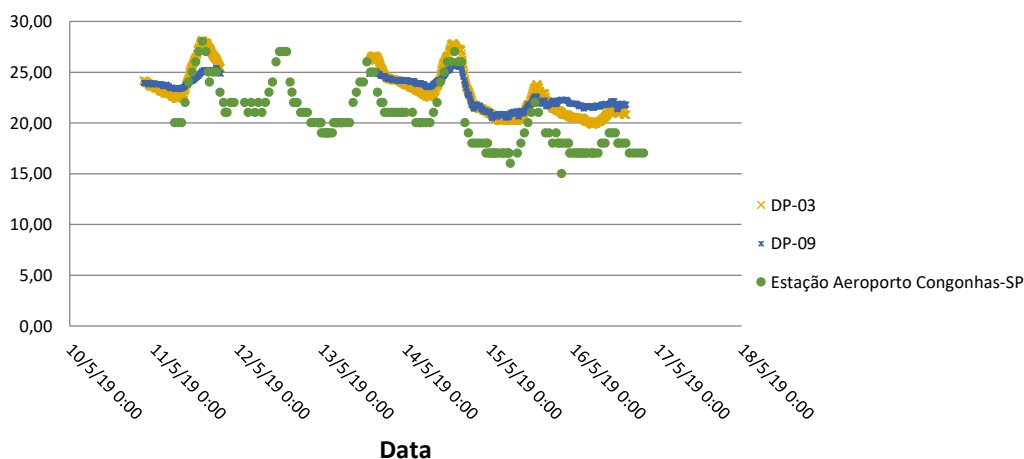


Gráfico 4. Temperatura (°C) dentro da área de estudo e na estação meteorológica do aeroporto de Congonhas-SP

Outro parâmetro monitorado foi o diferencial de pressão entre a subsuperfície e o ar ambiente conforme mencionado anteriormente. Os valores de diferencial de pressão positivos indicam gradiente de pressão com direção de fluxo da subsuperfície para o interior dos ambientes do edifício (intrusão de vapores). O Gráfico 5 apresenta o diferencial de pressão dos pontos DP-03 e DP-09 monitorados na área de estudo.

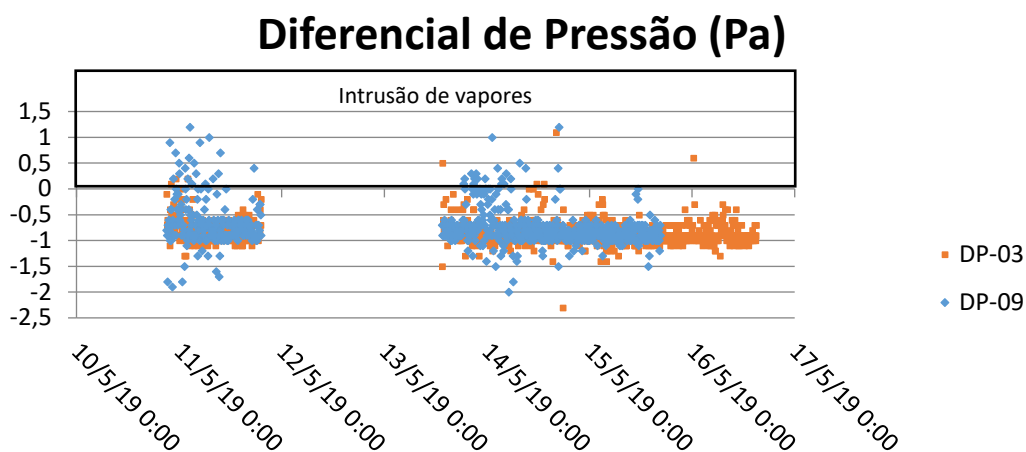


Gráfico 5. Diferencial de pressão dos pontos DP-03 e DP-09 monitorados na área de estudo.

O monitoramento automático indicou baixa frequência de eventos compatíveis com intrusão de vapores. Essa conclusão baseia-se na análise do diferencial de pressão entre ambientes e nas concentrações registradas nos poços PG-06 e VW-01, onde sensores estavam acoplados aos pontos de amostragem. O Gráfico 6 apresenta a distribuição em porcentagem dos resultados de diferencial de pressão para os pontos monitorados. Ressalta-se que o diferencial de pressão constitui um indicador primário de advecção, porém a intrusão também pode ocorrer por difusão mesmo na ausência de gradientes de pressão.

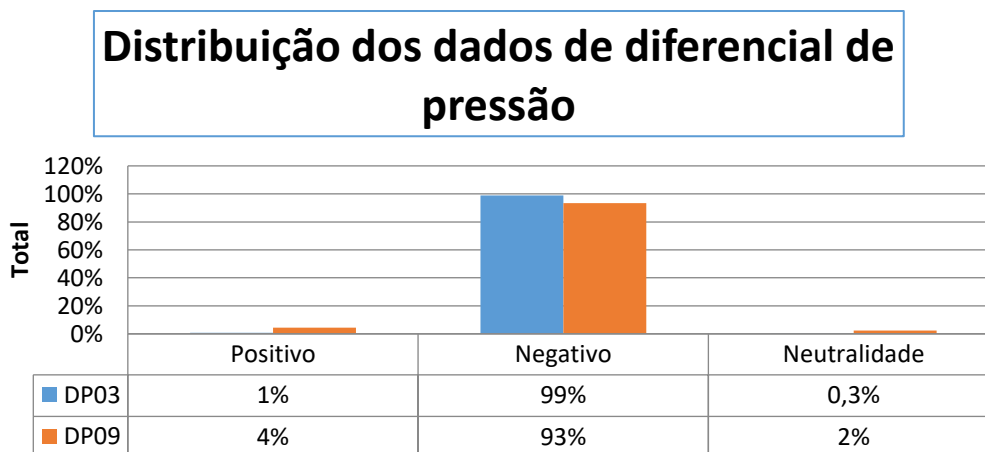


Gráfico 6. Distribuição em porcentagem dos resultados de diferencial de pressão para os pontos monitorados.

Com base nos resultados apresentados no Gráfico 6, pode-se observar que em mais de 93% do tempo não foram observados processos de intrusão de vapores do solo por fenômenos de advecção nos pontos de monitoramento, ou seja, o transporte desses compostos para o ar ambiente da área de estudo ocorreu com baixa frequência.

5.3. Integração dos Resultados e Discussões

O presente estudo apresentou o resultado de duas técnicas de amostragem de vapor do solo – a *summa canisters* e o monitoramento automático contínuo em investigações distintas – em uma área contaminada por tetracloroeteno e tricloroeteno.

O resultado obtido pela técnica *summa canisters* demonstrou concentrações de tetracloroeteno e tricloroeteno em níveis não observados no monitoramento automático contínuo, conforme observado na Tabela 3.

Pode-se observar uma grande variação entre os resultados obtidos pelas duas técnicas de amostragem, sendo que nos resultados pelo método TO-15 as concentrações para tetracloroeteno variaram entre 7,7 (L.Q.) e 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Já utilizando o método TO-14A, as concentrações não ultrapassaram 17,28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para o composto tricloroeteno foi observada uma variação dos resultados entre 1,8 (L.Q.) e 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pelo método TO-15, enquanto pelo TO-14A as concentrações não ultrapassaram 35,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabela 3 – Comparação entre as concentrações máximas obtidas pelas duas técnicas de investigação conduzidas na área de estudo.

Poço	Tetracloroeteno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) TO-15	Tetracloroeteno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) TO-14A	Tricloroeteno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) TO-15	Tricloroeteno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) TO-14A
PG-01	72	11,94	<LQ (1,8)	2,77
PG-02	3000	13,21	2000	4,4
PG-03	19	13,29	3,7	9,82
PG-06	880	17,28	230	35,72
PG-07	400	14,48	<LQ (1,8)	2,64
PG-08	24	13,51	<LQ (1,8)	2,57
VW-01	<LQ(170)	13,48	<LQ(130)	2,07
VW-02	<LQ (7,7)	11,33	<LQ (6,1)	3,43
VW-03	271	15,59	<LQ(6,7)	6,14

Legenda: < LQ = menor que o limite de quantificação.

As diferenças entre as concentrações observadas podem ser atribuídas a fatores relacionados às limitações analíticas e às condições de medição, bem como a variáveis ambientais. Destacam-se, nesse contexto, possíveis extrapolações além do limite superior da curva de calibração do método USEPA TO-14A e a saturação do detector por captura de elétrons (ECD), o qual é mais adequado para a quantificação de compostos em baixas concentrações ou em amostras previamente diluídas.

Adicionalmente, variáveis meteorológicas e processos naturais, como atenuação natural, reações químicas no meio, volatilização e adsorção, podem influenciar a variabilidade das concentrações observadas. Ressalta-se que a metodologia analítica, quando aplicada dentro de suas faixas operacionais, não deve, isoladamente, resultar em diferenças de ordem de grandeza entre os resultados.

O monitoramento automático contínuo forneceu informações de parâmetros meteorológicos que auxiliam na compreensão dos processos de intrusão de vapores, diferentemente do realizado na amostragem com o *summa canister*. Embora a medição de parâmetros meteorológicos durante a amostragem com *summa canister* seja viável, tal procedimento não é amplamente adotado no setor. O método de amostragem por *summa canister* destaca-se em investigações ambientais devido ao seu menor custo por ponto de monitoramento em comparação aos sistemas de monitoramento automático. Os parâmetros de temperatura ambiente, diferencial de pressão, pressão barométrica, velocidade e direção do vento são diferenciais para a interpretação dos resultados de concentrações. Conforme observado anteriormente, as concentrações sofrem variações ao longo do dia influenciadas por variáveis ambientais, sendo elas a variação da temperatura ambiente, a alteração do nível do aquífero, a alteração na pressão atmosférica, entre outras.

A partir da análise entre a variação das concentrações observada nos poços e o diferencial de pressão nos pontos de controle ao longo de um dia, pode-se identificar qual a magnitude das concentrações quando ocorreu o processo de intrusão de vapores do solo para o ar ambiente. Além disso, as condições estruturais do edifício, como fissuras, rachaduras nos pisos e falta de manutenção, junto às concentrações observadas nos poços instrumentados (onde também houve medição da diferença de pressão), foram consideradas suficientes para comprovar a ocorrência do processo de intrusão de vapores.

Nos dias 11/05/19 e 14/05/19 foram observadas as maiores frequências de valores positivos de diferencial de pressão (Gráfico 5), ou seja, nestas datas há uma maior probabilidade de ocorrer a intrusão de vapores do solo para o ar ambiente. Como forma de representar a realidade dos processos do meio físico, selecionou-se, como exemplo, o poço de monitoramento de vapor do solo PG-08 devido à proximidade da medição do DP-09. O Gráfico 7 apresenta a variação diária da concentração de tricloroeteno e tetracloroeteno no dia 11/05/2019. O Gráfico 8 apresenta a variação diária da concentração de tricloroeteno e tetracloroeteno no dia 14/05/2019.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que a ocorrência de concentrações máximas nos poços não implica, por si só, a ocorrência do processo de intrusão de vapores. Isso porque o diferencial de pressão não é

indicativo de aumento de concentrações no vapor do solo, mas sim de uma maior probabilidade de ingresso do vapor do solo no ambiente interno por vias preferenciais, aumentando a chance de se observar contaminantes no ar ambiente. Observa-se também que as concentrações de tetracloroetano, quando comparadas às de tricloroetano no PG-08, apresentaram maior variabilidade ao longo do monitoramento. Em 11/05/2019, a amplitude de concentração de tetracloroetano variou de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (abaixo do limite de quantificação) a $4,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$; em 14/05/2019, variou de $3,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $13,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Com base nesses resultados, torna-se possível compreender de forma mais assertiva quais concentrações são mais representativas durante períodos com maior propensão à intrusão e quais fatores externos podem influenciar a variabilidade temporal (inclusive sazonal) das concentrações. Adicionalmente, é possível orientar as amostragens pontuais por *summa canister* de forma a coletar nos períodos mais críticos.

6. CONCLUSÕES

Os resultados destas técnicas foram analisados e interpretados com o objetivo de compreender a magnitude dos compostos de interesse e sua representatividade em uma avaliação ambiental da intrusão de vapores do solo. Os compostos tetracloroetano e o tricloroetano foram utilizados como comparação, pois foram analisadas laboratorialmente para ambas as técnicas. Atualmente, foi previsto na Decisão de Diretoria da CETESB nº 38/2017, o mapeamento das plumas de vapores para a investigação direta dos cenários de intrusão de vapores. A amostragem por *Summa Canister* tem sido amplamente utilizada em investigações ambientais para analisar a magnitude das concentrações de contaminantes e delimitar sua distribuição espacial na subsuperfície. Entretanto, o mercado já dispõe de uma nova técnica de monitoramento automático contínuo, que propicia uma avaliação mais precisa dos processos de intrusão de vapores do solo, aprimorando a compreensão do comportamento desses vapores no ambiente físico. O aprofundamento do entendimento sobre esses processos favorece a elaboração de modelos conceituais mais aderentes às condições locais e contribui para avaliações de risco à saúde humana pela via de inalação mais conservadoras, visto que permite considerar as concentrações máximas observadas durante o monitoramento, ao contrário do método *Summa Canister*, que calcula apenas médias do período analisado e pode subestimar picos de concentração.

A amostragem por *Summa Canister* apresentou vantagens como a fácil implementação, o fato de proporcionar um longo tempo de retenção da amostra para análise (até 30 dias) e não necessitar de bomba de sucção. Entretanto, devido ao volume e ao peso, o armazenamento e transporte podem ser dificultados. Em relação aos resultados obtidos neste estudo, esta técnica forneceu valores únicos de concentração por poço amostrado em cada campanha, o que limitou a análise de padrões e tendências dos dados ambientais. Adicionalmente, conforme observado na área de estudo, esta técnica não permitiu a avaliação das variáveis ambientais locais, um fator importante na variabilidade dos processos de intrusão de vapores do solo.

O monitoramento automático contínuo, por sua vez, apresentou vantagens em relação ao *Summa Canister*, incluindo a identificação de padrões e tendências nos resultados obtidos na área, detecção de riscos potenciais em tempo real, obtenção de variáveis ambientais como diferencial de pressão, pressão barométrica, temperatura, velocidade e direção do vento, além de possibilitar análises com alta resolução. Contudo, também foram observadas limitações nesta técnica, tais como uma lista restrita de compostos analisados, possibilidade de contaminação cruzada no cromatógrafo em concentrações elevadas e necessidade de disponibilidade de pontos de energia para operação do sistema.

De forma geral, os resultados obtidos no presente estudo indicaram que o monitoramento automático contínuo proporcionou um diagnóstico mais representativo dos processos de intrusão de vapores na área avaliada. A análise de tendências dos dados, aliada à avaliação das interferências externas, especialmente as variáveis ambientais, permitiu um melhor entendimento do comportamento da contaminação e subsidiou de forma mais consistente a tomada de decisão. Nesse contexto, o monitoramento contínuo também se mostrou uma ferramenta estratégica para orientar campanhas de amostragem pontual por *Summa Canister*, permitindo a identificação dos períodos mais críticos de ocorrência da intrusão de vapores. Dessa forma, a aplicação integrada das duas técnicas possibilita otimizar a representatividade dos dados obtidos, associando a caracterização temporal detalhada ao refinamento das concentrações em momentos de maior relevância. Por outro lado, a técnica por *Summa Canister* mostrou-se mais adequada como linha auxiliar de evidência, fornecendo informações pontuais sobre a magnitude das concentrações e a distribuição horizontal da contaminação.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Áreas contaminadas**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-perigosos/areas-contaminadas.html>. Acesso em: 30 out. 2019.
- CITYCHLOR. **DRC-13-114341-03542A**: Soil-gas monitoring: soil-gas well designs and soil-gas sampling techniques. Ghent: Ineris, 2013.
- FETTER, C. W. **Contaminant hydrogeology**. New York: Macmillan Publishing Company, 1993.
- GOUVÊA JÚNIOR, J. C. R. *et al.* **Intrusão de vapores em ambientes fechados**: conceitos básicos, avaliação e gerenciamento de áreas contaminadas no Brasil. Porto Alegre: Nicole Brasil, 2016.
- GOUVÊA JÚNIOR, J. C. R.; BERTOLO, R. A.; HART, S. T. Intrusão de vapores do solo: breve histórico sobre desenvolvimento da tecnologia, cenário brasileiro e avanços recentes. **Holos Environment**, [s. l.], v.18, n. 2, p. 240–270, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/holos.v18i2.12307>
- KOPPMANN, R. (ed.). **Volatile Organic Compounds in the atmosphere**. Oxford: Blackwell Publishing, 2007.
- MA, J. *et al.* Vapor intrusion investigations and decision-making: a critical review. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 54, n. 12, p. 7050–7069, 2020. DOI: 10.1021/acs.est.0c00225. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00225>. Acesso em: 03 fev. 2025.
- MILANI, M. G. **Estudo de tecnologias de investigação ambiental em alta resolução para refinamento do modelo conceitual – Estudo de caso**: Duque de Caxias – RJ. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- SILVA, C. M. da *et al.* Avaliação da eficiência do método TO-15 para determinação de compostos orgânicos voláteis em condições típicas de ambiente urbano. **Química Nova**, São Paulo, v. 39, n. 10, p.1245-1253, 8 ago. 2016. DOI: <http://doi.org/10.21577/0100-4042.20160142>.
- USEPA. **Compendium Method TO-14A**: Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) In Ambient Air Using Specially Prepared Canisters with Subsequent Analysis by Gas Chromatography. Cincinnati, Oh: U.S. Environmental Protection Agency, 1999a.
- USEPA. **Compendium Method TO-15**: Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in U. S. Air Collected in Specially Prepared Canisters and Analyzed by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). [Washington], 1999b. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/airtox/to-15r.pdf>. Acesso em: fev. 2016.
- USEPA. **Oswer technical guide for assessing and mitigating the vapor intrusion pathway from subsurface vapor sources to indoor air**. [Washington], Jun. 2015.
- USEPA. **Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air**. 2th ed. [Washington], 1999c. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/airtox/tocomp99.pdf>. Acesso em: nov. 2019.