

Risco tecnologico à saúde humana: estudo de caso

Georgia Felicio Marinho da Silva

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Mestranda em Engenharia Ambiental

✉ georgia.ambiental@gmail.com

Carolina Dias Lelacher

Dasi Consultoria E Engenharia,

✉ lelacher@hotmail.com

Letícia Cardoso Ferreira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro,

✉ flcardoso.blog@gmail.com

Patrícia dos Santos Matta

Universidade do Estado do Rio de Janeiro –ZO

✉ patricia.matta@uerj.br

Josimar Ribeiro de Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Doutorado em Engenharia Ambiental

✉ almeida@poli.ufrj.br

Resumo:

Refletir sobre os impactos decorrentes de postos combustíveis e seus efeitos para a saúde humana contribuem para o desenvolvimento de uma perspectiva ampla de gestão ambiental. Nesse sentido o desenvolvimento e a aplicação de técnicas que contribuam para a mitigação de impactos ambientais em postos combustíveis tornam-se uma alternativa necessária. A utilização da técnica da Análise de Riscos tem sido amplamente utilizada para a mitigação de impactos ambientais, visando a proposição de soluções ambientais e a promoção da saúde humana. Desta forma, o presente estudo de caso apresenta-se comoparte do trabalho intitulado “Avaliação da Presença de Combustível no Solo e Lençol Freático”, no qual utilizou-se a metodologia para a análise de risco baseada em moldes de Tier 2 para compostos BTXE (Benzeno, Tolueno, Xilenos e Etilbenzeno), através do modelo para cálculos backward (inverso). Para tanto, foram instalados 5 poços para a coleta e monitoramento de água subterrânea e 27 pontos de sondagensde amostras de solo, para a avaliação das concentrações máximas permitidas (SSTL)de compostos orgânicos voláteis, análises de BTXE (Benzeno, Tolueno, Xilenos e Etilbenzenos), chumbo tetraetila e TPH (Hidrocarbonetos Totais de Petróleo). Em seguida, comparou-se os resultados obtidos com o padrão nacional disponível (Portaria 36 – Ministério da Saúde) e padrões internacionais (Lista Holandesa, Lista Canadense e Guia de Portabilidade de Águas da OMS – Organização Mundial de Saúde). Sendo assim, conclui-se que para as águas subterrâneas os compostos de benzeno possuem certo grau de risco à saúde humana; em contrapartida para amostras de solo e águas subterrâneasos compostos tolueno, etilbenzeno e xilenos, apresentaram-se inofensivos à saúde humana.

Palavras-chave: Saúde Ambiental, Análise de Risco, Postos de Combustíveis, Solo, Água.

Technological risk to human health: case study

Abstract:

Reflecting on the impacts resulting from gas stations and their effects on human health contributes to the development of a broad perspective on environmental management. In this sense, the devel-

opment and application of techniques that contribute to the mitigation of environmental impacts at gas stations become a necessary alternative. The use of the Risk Analysis technique has been widely used for the mitigation of environmental impacts, aiming at the proposition of environmental solutions and the promotion of human health. In this way, the present case study is presented as part of the work entitled "Assessment of the Presence of Fuel in the Soil and Water Table", in which the methodology for risk analysis based on Tier 2 molds for BTXE compounds (Benzene, Toluene, Xylene and Ethylbenzene) was used, through the model for backward calculations. To do so, 5 wells were installed for groundwater collection and monitoring and 27 soil sample sampling points were installed for the evaluation of maximum allowable concentrations (MSTL) of volatile organic compounds, BTXE (Benzene, Toluene, Xylene and Ethylbenzene) analyses, tetraethyl lead and TPH (Total Petroleum Hydrocarbons). The results obtained were then compared with the available national standard (Ordinance 36 - Ministry of Health) and international standards (Dutch List, Canadian List, and WHO Water Portability Guide - World Health Organization). Thus, it was concluded that for groundwater the benzene compounds present a certain degree of risk to human health; on the other hand, for soil and groundwater samples the compounds toluene, ethylbenzene and xylene were harmless to human health.

Keywords: Environmental Health, Risk Analysis, Gas Stations, Soil, Water.

Riesgo tecnológico para la salud humana: estudio de un caso

Resumen:

La reflexión sobre los impactos derivados de las gasolineras y sus efectos sobre la salud humana contribuye al desarrollo de una perspectiva amplia de gestión ambiental. En este sentido, el desarrollo y la aplicación de técnicas que contribuyan a la mitigación de los impactos ambientales en las gasolineras se convierten en una alternativa necesaria. La utilización de la técnica de Análisis de Riesgo ha sido ampliamente utilizada para la mitigación de impactos ambientales, visando la proposición de soluciones ambientales y la promoción de la salud humana. De esta forma, se presenta el presente estudio de caso como parte del trabajo titulado "Evaluación de la Presencia de Combustible en el Suelo y en el Nivel Freático", en el cual se utilizó la metodología de análisis de riesgo basada en moldes Tier 2 para compuestos BTXE (Benceno, Tolueno, Xileno y Etilbenceno), a través del modelo de cálculos retrospectivos. Para ello, se instalaron 5 pozos de captación y monitorización de aguas subterráneas y 27 puntos de muestreo de muestras de suelo, para la evaluación de concentraciones máximas admisibles (CMA) de compuestos orgánicos volátiles, análisis de BTXE (Benceno, Tolueno, Xileno y Etilbenceno), tetraetilo de plomo y TPH (Hidrocarburos Totales del Petróleo). A continuación, se compararon los resultados obtenidos con la norma nacional disponible (Norma Administrativa 36 - Ministerio de Sanidad) y las normas internacionales (Lista Holandesa, Lista Canadiense y Guía de la OMS para la portabilidad del agua - Organización Mundial de la Salud). Así, se concluye que para las aguas subterráneas los compuestos de benceno poseen cierto grado de riesgo para la salud humana; en cambio para muestras de aguas subterráneas y subterráneas los compuestos tolueno, etilbenceno y xilenos, se habían presentado inocuos para la salud humana.

Palabras clave: Caries dental, Salud Bucal, Calidad de Vida, Adolescente, Adultos.

INTRODUÇÃO

O estudo de análise de risco em postos de combustíveis vem se mostrando cada vez mais necessário em virtude do potencial gerador de impacto à saúde ambiental associado aos compostos presentes na gasolina. Há que se pensar a saúde ambiental como o ramo da saúde

pública que considera não apenas a ausência de doença do ser humano, como também, todas as interações sociais, culturais e econômicas estabelecidas entre o homem e o meio ambiente (BRASIL, 2015).

Desse forma, técnicas para o aprimoramento da análise de risco tem sido elaboradas, destacando-se o estudo de análise de risco desenvolvida pelo *American Society for Testing and Materials (ASTM): Standard Guide for Risk-Based Corrective Action (RBCA)* aplicado a sites onde ocorreram vazamentos de combustíveis (ASTM E 1739 – 95) (Brito, 2025).

A análise de risco é fundamental para o controle e monitoramento de ambientes aquáticos, terrestres, atmosféricos, bióticos e abióticos em postos de combustíveis, assegurando o equilíbrio ambiental dessas atividades (Brito, 2005). Este estudo realizou uma análise de risco seguindo os parâmetros do Tier 2 para compostos BTXE (Benzeno, Tolueno, Xilenos e Etilbenzeno), utilizando o modelo de cálculo inverso (backward). Este modelo considera o risco máximo aceitável no solo e na água subterrânea, conforme os padrões estabelecidos pela ASTM (ASTM, 1998). Com base nesses valores, nos receptores potenciais, nos caminhos de exposição, nos dados de toxicidade e nas características físico-químicas dos compostos estudados, foram determinadas as concentrações máximas permitidas (SSTL) no solo e na água subterrânea para os compostos analisados, especificamente no local em questão.

O posto de gasolina analisado neste estudo está em operação há cerca de 50 anos, funcionando como ponto de abastecimento de combustíveis e troca de óleo, sem registros de uso anterior do solo para atividades agrícolas (Silva *et al.*, 2010). A região é abastecida com água tratada fornecida pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE), responsável também pela coleta de esgoto. Não há registros de utilização de águas subterrâneas pelo posto de combustível, e verificou-se que o escoamento dessas águas ocorre em direção à lagoa, sendo suscetível à influência das marés (Gomes e Almeida, 2012).

Informações indicam que a principal fonte de contaminação foi um vazamento nas linhas de gasolina antes de uma reforma completa realizada em junho de 1998, quando todas as instalações foram substituídas (Souza, 1999). Para o desenvolvimento deste estudo, foram realizadas vistorias simultâneas em 27 pontos de sondagem, visando ao reconhecimento do local e à medição de compostos orgânicos voláteis no solo. Foram coletadas amostras de solo para análise química dos compostos BTXE, chumbo tetraetila e TPH (Hidrocarbonetos Totais

de Petróleo), além da instalação de cinco poços de monitoramento e coleta de amostras de água subterrânea para análise dos mesmos compostos presentes no solo (Ferreira *et al.*, 2008).

Os resultados analíticos foram comparados com padrões nacionais disponíveis, como a Portaria nº 36 do Ministério da Saúde (Brasil, 1990), e internacionais, como a Lista Holandesa, a Lista Canadense e o Guia de Potabilidade de Águas da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2004), para os compostos em questão. Devido às limitações das listas de referência utilizadas para comparação dos resultados analíticos, foi recomendada a realização de uma análise de risco nos moldes do RBCA (Risk-Based Corrective Action) Tier 2, específica para locais onde ocorre manipulação de combustíveis, visando ao estabelecimento de padrões de BTXE específicos para a área do posto (USEPA, 2002).

Com base nos dados obtidos, busca-se dimensionar a magnitude e os riscos ambientais representados pela contaminação no posto de gasolina, projetando as ações de remediação eventualmente necessárias (Brito, 2005).

TABELA 1.1 – Resultados das análises químicas da btxe – solo (mg/kg)

Nº da Amostra/Sondagem	Intervalo Amostrado	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xilenos
SS-01	1,1-1,3	<0,039	<0,039	<0,039	<0,058
SS-02	1,1-1,3	<0,039	<0,039	8,206	5,314
SS-03	1,3-1,4	<0,035	<0,035	<0,035	0,286
SS-04	1,1-1,3	<0,039	<0,039	<0,039	<0,058
SS-05	1,2-1,4	<0,038	<0,038	<0,038	<0,057
Max		0,019	0,019	8,206	5,314
Média		0,019	0,019	1,6563	1,1373

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 1.2 – Resultados das análises químicas da btxe – solo (mg/kg)

N° da Amostra	Ponto de Co- leta	Benzeno	Tolueno	Etilbenzeno	Xilenos
AA-01	PM-01	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
AA-02	PM-02	0,65	0,013	0,022	0,59
AA -03	PM-03	2,9	3,2	1,1	7,7
AA-04	PM-04	0,24	<0,0005	0,2	0,87
AA-05	PM-05	0,5	0,012	0,027	1,786
AA-06	PM-04	0,13	0,15	0,044	0,176
Max		2,9	3,2	1,1	7,7
Média		0,7367	0,5626	0,2322	1,8537

Fonte: Os próprios autores.

MÉTODO

Para a avaliação da exposição utilizando a metodologia RBCA, foi desenvolvido um Modelo de Exposição Conceitual do Local (MECL) considerando as condições atuais e futuras do site em estudo.

Modelo de Exposição Conceitual do Local (MECL) para as Condições Atuais

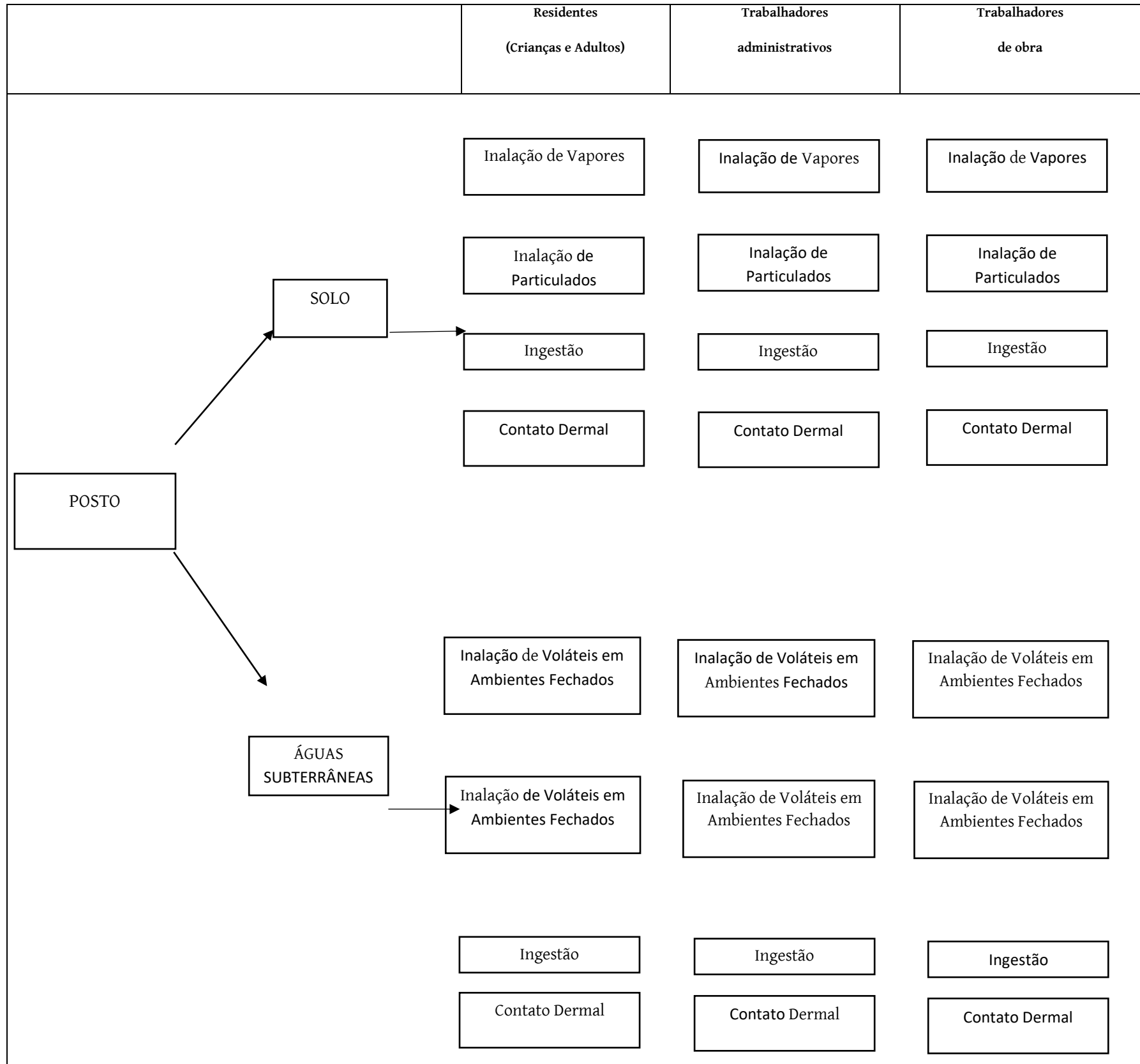
O local em análise é atualmente um posto de abastecimento de combustíveis, cercado por residências e estabelecimentos comerciais. Os principais receptores de interesse identificados incluem funcionários administrativos e trabalhadores de eventuais obras. Com base nesses fatores, a Figura 2.1 e a Tabela 2.1 apresentam os caminhos completos e rotas de expo-

sição considerados na análise de risco (RBCA).

Modelo de Exposição Conceitual do Local (MECL) para as Condições Futuras

De acordo com informações fornecidas pela TEXACO, a área estudada continuará a ser utilizada para os mesmos fins no futuro. Dado que o cenário permanecerá inalterado, o MECL para as condições futuras será idêntico ao das condições atuais. Dessa forma, não será necessário realizar novos cálculos, pois as concentrações objetivo determinadas para as condições atuais serão aplicadas diretamente ao cenário futuro.

FIGURA 2.1 – Fluxograma de avaliação de exposição



Fonte: Os próprios autores.

Inalação

Caminhos Potenciais completo

Inalação

Caminhos Potenciais completo

TABELA 2.2 – Caminhos completos e rotas de exposição

Posto de Gasolina			
Fonte e rota de exposição	Residentes (crianças e adultos)	Trabalhadores adminis- trativos	Trabalhadores de obras
Solo			
Inalação de vapores	FALSE	TRUE	TRUE
Inalação de particulados	FALSE	FALSE	TRUE
Ingestão	FALSE	FALSE	TRUE
Contato dermal	FALSE	FALSE	TRUE
Água Subterrânea			
Inalação de voláteis em ambientes fechados	FALSE	TRUE	Cam. Incompleto
Inalação de voláteis em ambientes abertos	TRUE	TRUE	TRUE
Ingestão	TRUE	FALSE	Cam. Incompleto
Contato dermal (direct)	Cam. incompleto	Cam. incompleto	TRUE

Fonte: Os próprios autores

FATORES DE EXPOSIÇÃO, PROPRIEDADES TOXICOLÓGICAS E PARÂMETROS DE DESTINO E TRANSPORTE

A liberação dos compostos químicos de interesse no solo é estimada usando modelos como descrito na documentação guia da **ASTM E 1739-95**.

Os parâmetros de destino e transporte utilizados para cálculo do modelo foram baseados em informações específicas do local e em valores, foram baseados em informações específicas do local e em valores da **ASTM E1739-95** apresentados na tabela 2.3.

Os fatores da exposição utilizados e seus respectivos valores, foram baseados na **ASTM E1739-95** e em experiências profissionais adquiridas (**Tabela 2.4**).

As propriedades químicas de cada composto, e os valores de toxicidade usados para estimar o risco e o quociente de perigo são apresentados respectivamente nas tabelas 2.5 e 2.6.

Foi adotado um risco-objetivo conservador de 1×10^{-6} (ASTM) e um quociente de perigo de 1 (ASTM) para compostos químicos carcinogênicos e não carcinogênicos e não-carcinogênicos, respectivamente.

TABELA 2.3 – Parâmetros de destino e transporte

Posto de gasolina

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Valores utilizados	Referência
PARÂMETROS DO SITE:				
Maior extensão da área fonte	W	cm	2000	Específico no site
Maior extensão da área onde pode haver obras	W	cm	3000	Específico no site
Espessura do solo superficial contaminado	d	cm	150	Específico no site
Profundidade até o topo do solo subsuperficial contaminado	Ls	cm	150	Específico no site
PARAMETROS DO SOLO				
Densidade do solo seco		g/cm ³	1,85	Experiência Prof.
Matéria orgânica	foc	g/C/g-SOLO	0,01	ASTM
Porosidade total do solo		-	0,25	FETTER,1988
Espessura da franja capilar	hcap	cm	5	ASTM
Espessura da zona vadosa	hv	Cm	150	Específico do site

Risco tecnologico à saúde humana: estudo de caso

Volume de água contido na franja capilar	-	0,225	90% da porosidade
Volume de água contido na zona vadosa	-	0,12	Experiência Prof
Volume de água contido nas fundações	-	0,12	
Volume de ar contido na franja capilar	-	0,025	
Volume de ar contido na sombra vadosa	-	0,13	
Volume de água contido nas fundações	-	0,13	

PARÂMETROS RELATIVOS À ÁGUA SUBTERRÂNEA:

Profundidade da água subterrânea	Lgw	cm	150	=h _{cpa} + h _v
Velocidade de Darcy (Gradiente hidráulico * Condutividade hidráulica)	Ugw	Cm/ano	37000	Específicos do site
Espessura da zona de variação da água	dgw	cm	200	ASTM
Razão de infiltração de água no solo	IR	cm/ano	30	ASTM
Comprimento da fonte (Perpendicular ao fluxo da água subterrânea)	Y	cm	2000	Específico do site
Distancia da fonte até o POE para ingestão da água subterrânea	X _{poe.gw}	cm	5000	Específico do site
Dispersividade longitudinal de água subterrânea (x)	ax	cm	500,00	=X _{poe} /10
Dispersividade transversal de água subterrânea (y)	ay	cm		=X _{poe} /30
Dispersividade vertical (z)	az	cm	25,00	=X _{poe} /200

PARAMETROS PARA AMBIENTES ABERTOS:

Altura do ar respirado em ambientes abertos		cm	200	ASTM
Velocidade dos ventos em ambientes abertos	Ua	cm/seg	225	ASTM
Distancia da fonte até o POE para inalação de ar em ambientes abertos	X _{poe.air}	cm	1	Específico do site
Dispersividade transversal de ar em ambientes abertos (y)	Xy	cm	0,18	Calculado

Dispersividade vertical de ar em ambientes abertos (z)	Xz	cm	0,14	Calculado
Razão de emissão de particulados	Pe	g/cm ² seg	9,9E-14	ASTM
PARÂMETROS PARA AMBIENTES FECHADOS:				
Renovação de ar em ambientes fechados				
Residencial	ER	1/seg	0,00014	ASTM
Comercial	ER	1/seg	0,00023	ASTM
Altura do ambiente				
Residencial	Lb	cm	200	ASTM
Comercial	Lb	cm	300	ASTM
Espessura da fundação ou da parede				
Residencial	Lcrak	cm	15	ASTM
Comercial	Lcrak	cm	15	ASTM
Área de rachaduras das fundações/paredes				
Residencial	h	-	0,001	Específico do site
Comercial	h	-	0,001	Específico do site

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 2.4 – Fatores de exposição

Posto de gasolina

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Valores utilizados	Referência
Risco máximo aceitável	TR	-	100E-06	ASTM
Máximo quociente de perigo	THQ	-	1	ASTM
PESO				
Crianças residentes	BW	Kg	16	RAGS
Adultos residentes	BW	Kg	70	ASTM
Trabalhadores administrativo	BW	Kg	70	ASTM
Trabalhadores de obras	BW	Kg	70	ASTM
DURAÇÃO DE EXPOSIÇÃO:				
Crianças residentes	ED	Ano	6	RAGS
Adultos residentes	ED	Ano	20	Exp. Profissional
Trabalhadores administrativo	ED	Ano	25	ASTM
Trabalhadores de obras	ED	Ano	1	Exp. Profissional
FREQUENCIA DE EXPOSIÇÃO:				
Crianças residentes	EF	dia/ano	200	ASTM
Adultos residentes	EF	dia/ano	200	Exp. Profissional
Trabalhadores administrativo	EF	dia/ano	250	ASTM
Trabalhadores de obras	EF	dia/ano	10	Exp. Profissional
RAZÃO DE INALAÇÃO EM AMBIENTES ABERTOS:				

Crianças residentes	IRa	m ³ /dia	15	Exp. Profissional
Adultos residentes	IRa	m ³ /dia	20	ASTM
Trabalhadores administrativo	IRa	m ³ /dia	20	ASTM
Trabalhadores de obras	IRa	m ³ /dia	20	Exp. Profissional

RAZÃO DE INALAÇÃO EM AMBIENTES FECHADOS:

Crianças residentes	IRa	m ³ /dia	20	Exp. Profissional
Adultos residentes	IRa	m ³ /dia	20	ASTM
Trabalhadores administrativo	IRa	m ³ /dia	20	ASTM

ÁREA SUPERFICIAL DA PELE

Crianças residentes	SA	cm ²	2100	Exp. Profissional
Adultos residentes	SA	cm ²	1700	ASTM
Trabalhadores administrativo	SA	cm ²	1700	ASTM
Trabalhadores de obras	SA	cm ²	1700	Exp. Profissional

FATOR ADERÊNCIA

Crianças residentes	M	mg/cm ²	0,5	Exp. Profissional
Adultos residentes	M	mg/cm ²	0,5	ASTM
Trabalhadores administrativo	M	mg/cm ²	0,5	ASTM
Trabalhadores de obras	M	mg/cm ²	0,5	Exp. Profissional

RAZÃO DE INGESTÃO DE ÁGUAS SUBTERRANEAS

Crianças residentes	IRw	L/dia	0,01	Exp. Profissional
---------------------	-----	-------	------	-------------------

Risco tecnologico à saúde humana: estudo de caso

Adultos residentes	IRw	L/dia	0,01	Exp. Profissional
Trabalhadores administrativo	IRw	L/dia	1	ASTM
CONTATO DERMAL COM A ÁGUA SUBTERRÂNEA				
Tempo de exposição	T.dc	hr	1	Exp. Profissional
Grossura da pele	d.skin	cm	0,001	RAGS

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 2.5 – Propriedades químicas dos compostos

Posto de gasolina

Compostos Químicos	Solubilidade da água (mg/L)	Peso Molecular (gr/mole)	Lei de Henry Constante (—)	Carbon Org. Coef. Ads. Koc (mL/g)	Log Coef. De Partic. Log Kow [—]	Coeficiente de difusão		Const.dede-grad.
						no ar (cm ² /s)	na água (cm ² /s)	
VOCs								
Benzeno	175E+03	7,81E+01	2,20E-01	3,80E+01	2,20E+00	9,30E-02	1,10E-05	0,00E+00
Etilbenzeno	1,52E+02	1,06E+02	3,20E-01	9,55E+01	3,15E+00	7,60E-06	8,50E-06	0,00E+00
Tolueno	5,15E+02	9,24E+01	2,60E-01	1,35E+02	2,80+00	8,50E-02	9,40E-06	0,00E+00
Xilenos (to-tais)	1,98E+02	1,06E+02	2,90E-01	2,40E+02	3,20E+00	7,20E-02	8,50E-06	0,00E+00

Fonte: Os próprios autores

TABELA 2.6 – Propriedades químicas dos compostos

Posto de gasolina

Compostos Químicos	Fator de decaimento		Dose de Ref.		Oral Rel.	Derm. Rel
	Oral (SFo)	Inal.(SFi)	Oral (RfDo)	Inal.(RfDi)	Factor Abs (RAFo)	Fac. Abs (RAFd)
	[Kg-dia/mg]	[Kg-dia/mg]	[mg/Kg-dia]	[mg/Kg-dia]		
VolatileOrganicCompounds						
Benzeno	0,029	0,029	-	0,0017	1	0,5
Etilbenzeno	-	-	0,1	0,29	1	0,5
Tolueno	-	-	0,2	0,11	1	0,5
Xilenos (totais)	-	-	2	0,086	1	0,5

Fonte: Os próprios autores.

RESULTADOS

Os resultados das análises químicas das amostras de solo encontram-se na Tabela 1.1. Os dados indicam a presença de BTXE em concentrações relativamente baixas. No entanto, alguns valores excederam os limites estabelecidos pela Lista Holandesa, exigindo uma análise de risco para verificar os limites máximos permitidos especificamente para o site estudado.

As concentrações de BTXE nas amostras de água subterrânea, coletadas nos poços de monitoramento, estão apresentadas na Tabela 1.2. Os resultados demonstram que as concentrações encontradas na água subterrânea são relativamente altas quando comparadas aos limites da Lista Holandesa. Assim, foi realizada uma análise de risco para determinar a adequação dos limites máximos desses parâmetros à realidade do site em questão.

Os dados obtidos evidenciam a necessidade de avaliação contínua das concentrações de BTXE, considerando sua distribuição nas diferentes matrizes ambientais do local de estudo. A comparação com os padrões de referência reforça a importância do monitoramento ambiental e da adoção de medidas de mitigação apropriadas.

A comparação entre as concentrações máximas e médias encontradas no site e os limites máximos estabelecidos através do RBCA no solo e água subterrânea, os valores podem ser vistos na Tabela 3.1. Observa-se que as concentrações médias e máxima do benzeno nas águas subterrâneas ultrapassam os valores máximos estabelecidos para estes parâmetros no site em questão.

As tabelas 3.2 e 3.3, mostram respectivamente os limites máximos e mínimos estabelecidos através do modelo para o solo e água subterrânea, em todos os caminhos de exposição considerados.

As tabelas 3.4 a 3.5 apresentam os valores limites para cada receptor analisado em todos os caminhos de exposição considerados para os compostos BTXE. Os campos preenchidos por “CI” indicam os caminhos incompletos e portanto, não foram calculados e os campos preenchidos por “NA” identificam os caminhos não aplicáveis por se tratarem de compostos carcinogênicos ou não-carcinogênicos.

Comparando-se as concentrações máximas e médias de BTXE obtidas nas amostras de solo, verifica-se que nenhum composto ultrapassa o limite máximo estabelecido pelo RBCA (SSTL) para o solo.

TABELA 2.7 - Comparação entre os limites máximos estabelecidos através do rbca e as concentrações encontradas no solo e águas subterranea

Posto de gasolina

Compostos químicos	Concentração no solo			Concentrações nas águas subterrâneas		
	Máximas	Média	SSTLs	Máximas	Média	SSTLs
	[mg/kg]	(mg/kg)	(mg/kg)	[mg/L]	(mg/L)	(mg/L)
VOCs						
Benzeno	1,90E-02	1,90E-02	3,15E+01	2,90E+00 FAIL	7,37E-01	1,47E+00
Etilbenzeno	8,21E+00	1,66E+00	9,47E+04 > RES	1,11E+00	2,32E-01	1,18E+03 > RES
Tolueno	1,90E-02	1,90E-02	3,59E+04 > RES	3,20E+00	5,63E-01	1,55E+03 > RES
Xilenos (totais)	5,31E+00	1,14E+00	2,81E+04 > RES	7,70E+00	1,85E+00	1,29E+03 > RES

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 2.8 - Resumo das máximas concentrações calculadas para o solo [mg/kg]

Posto de gasolina

Compostos químicos	Crianças	Adultos	Trabalhadores	Trabalhadores	Concentrações
	Residentes	Residentes	Administrativos	de obra	Mais restritas
VOCs					
Benzeno	Cl	Cl	3,15E+01		3,15E+01
Etilbenzeno	Cl	Cl	9,47E+04	>res	9,47E+04 > RES
Tolueno	Cl	Cl	3,59E+04	>res	3,59E+04 > RES
Xilenos (totais)	Cl	Cl	2,81E+04	>res	2,81E+04 > RES

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 2.9 - Resumo das máximas concentrações calculadas para água subterrânea [mg/kg]

Posto de gasolina

Risco tecnologico à saúde humana: estudo de caso

Compostos químicos	Crianças Residentes	Adultos Residentes	Trabalhadores Administrativos	Trabalhadores de obra	Concentrações Mais restritas
VOCs					
Benzeno	8,87+00	1,16E+01	1,47E+00	1,03E+02	1,47E+00
Etilbenzeno	2,21E+03	9,65E+03	3,73E+03	1,18E+03	1,18E+03 > SOL
Tolueno	4,41E+03	1,93E+04	1,55E+03	3,58E+03	1,55E+03 > SOL
Xilenos (totais)	8,77E+03	2,88E+04	1,29E+03	2,17E+04	1,29E+03 > SOL

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 3.0 - SSTLs para Crianças Residentes – CARCINOGENICOS

Posto de gasolina

Compostos químicos	Ar	Ar	Solo superf.	Águas subter-raneas	Águas sub-terrânea	Águas sub-terrânea
	Inalação em Amb. Fechado [mg/m ³ -ar]	Inalação em Amb. Abertos [mg/m ³ -ar]	Ingestão Inalação e Contato Der-mal [mg/kg]	Ingestão [mg/L]	Inalação em Amb. Fechados [mg/L]	Inalação em Amb. Abertos [mg/L]
VOCs						
Benzeno	Cl	7,83E-01	Cl	8,87E+00	Cl	3,81E+01
Etilbenzeno	Cl	NA	Cl	NA	Cl	NA
Tolueno	Cl	NA	Cl	NA	Cl	NA
Xilenos (totais)	Cl	NA	Cl	NA	Cl	NA

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 3.1 - SSTLs para Crianças Residentes – NÃO CARCINOGENICOS

Posto de gasolina

Compostos químicos	Ar	Ar	Solo superf.	Águas subter- râneas	Águas sub- terrânea	Águas sub- terrânea
	Inalação em Amb. Fechado [mg/m ³ -ar]	Inalação em Amb. Abertos [mg/m ³ -ar]	Ingestão Ina- lação e Contato Der- mal [mg/kg]	Ingestão [mg/L]	Inalação em Amb. Fecha- dos [mg/L]	Inalação em Amb. Aber- tos [mg/L]
VOCs						
Benzeno	Cl	3,31E+00	Cl	NA	Cl	1,61E+02
Etilbenzeno	Cl	5,65+02	Cl	2,21+03	Cl	2,66E+04
Tolueno	Cl	2,14E+02	Cl	4,41E+03	Cl	1,05E+04
Xilenos (totais)	Cl	1,67E+02	Cl	4,41E+04	Cl	8,77E+03

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 3.2 - SSTLs para adultos Residentes – CARCINOGENICOS

Posto de gasolina

Risco tecnológico à saúde humana: estudo de caso

Compostos químicos	Ar	Ar	Solo superf.	Águas subter- râneas	Águas sub- terrânea	Águas sub- terrânea
	Inalação em Amb. Fechado [mg/m ³ -ar]	Inalação em Amb. Abertos [mg/m ³ -ar]	Ingestão Ina- lação e Contato Der- mal [mg/kg]	Ingestão [mg/L]	Inalação em Amb. Fecha- dos [mg/L]	Inalação em Amb. Aber- tos [mg/L]
VOCs						
Benzeno	Cl	7,71E-01	Cl	1,16E+01	Cl	3,75E+01
Etilbenzeno	Cl	NA	Cl	NA	Cl	NA
Tolueno	Cl	NA	Cl	NA	Cl	NA
Xilenos (totais)	Cl	NA	Cl	NA	Cl	NA

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 3.3 - SSTLs para adultos Residentes – NÃO CARCINOGENÉTICOS

Posto de gasolina

Compostos químicos	Ar	Ar	Solo su- perf.	Solo subsu- perf.	Solo sub- superf.	Águas sub- terrâneas	Águas subterrâ- nea	Águas sub- terrânea
	Inalação em Amb. Fe- chado [mg/m ³ - ar]	Inalação em Amb. Abertos [mg/m ³ - ar]	Ingestão Inalação e Contato Dermal [mg/kg]	Inalação em Amb. fe- chados [mg/kg]	Inalação em Amb. aber- tos [mg/kg]	Ingestão [mg/L]	Inalação em Amb. Fe- chados [mg/L]	Inalação em Amb. Abertos [mg/L]
VOCs								
Benzeno	Cl	1,09E+01	Cl	#VALUE!	Cl	NA	Cl	5,28E+02
Etilbenzeno	Cl	1,85E+03	Cl	#VALUE!	Cl	9,65E+03	Cl	8,73E+04
Tolueno	Cl	7,03E+02	Cl	#VALUE!	Cl	1,93E+04	Cl	3,43E+04
Xilenos (to- tais)	Cl	5,49E+02	Cl	#VALUE!	Cl	1,93E+05	Cl	2,88E+04

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 3.4 - SSTLs para trabalhadores Administrativo – CARCINOGENICOS

Posto de gasolina

Risco tecnologico à saúde humana: estudo de caso

Compostos químicos	Ar	Ar	Solo superf.	Águas subterrâneas	Água subterrânea	Água subterrânea
	Inalação em Amb. Fechado [mg/m ³ -ar]	Inalação em Amb. Abertos [mg/m ³ -ar]	Ingestão Inalação e Contato Dermal [mg/kg]	Ingestão [mg/L]	Inalação em Amb. Fechados [mg/L]	Inalação em Amb. Abertos [mg/L]
VOCs						
Benzeno	4,93E-01	4,93E-01	3,15E+01	Cl	1,47E+00	2,40E+01
Etilbenzeno	NA	NA	NA	Cl	NA	NA
Tolueno	NA	NA	NA	Cl	NA	NA
Xilenos (totais)	NA	NA	NA	Cl	NA	NA

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 3.5 - SSTLs para trabalhadores Administrativo – NÃO CARCINOGENICOS

Posto de gasolina

Compostos químicos	Ar	Ar	Solo superf.	Solo subsuperf.	Solo subsuperf.	Águas subterrâneas	Água subterrânea	Água subterrânea
	Inalação em Amb. Fechado [mg/m ³ -ar]	Inalação em Amb. Abertos [mg/m ³ -ar]	Ingestão Inalação e Contato Dermal [mg/kg]	Inalação em Amb. fechados [mg/kg]	Inalação em Amb. abertos [mg/kg]	Ingestão [mg/L]	Inalação em Amb. Fechados [mg/L]	Inalação em Amb. Abertos [mg/L]
VOCs								
Benzeno	8,69E+00	8,69E+00	5,55E+02	Cl	Cl	Cl	2,58E+01	4,23E+02
Etilbenzeno	1,48E+03	1,48E+03	9,47E+04	Cl	Cl	Cl	3,73E+03	6,98E+04
Tolueno	5,62E+02	5,62E+02	3,59E+04	Cl	Cl	Cl	1,55E+03	2,74E+04
Xilenos (totais)	4,39E+02	4,39E+02	2,81E+04	Cl	Cl	Cl	1,29+03	2,30E+04

Risco tecnológico à saúde humana: estudo de caso

Compostos químicos	Ar Inalação em Amb. Abertos [mg/m ³ -ar]	Solo superf. Ingestão Inalação e Contato Dermal [mg/kg]	Águas subterrâneas Contato Dermal [mg/L]	Águas subterrânea Inalação em Amb. Abertos [mg/L]
VOCs				
Benzeno	3,08E+02	5,73E+02	1,03E+02	1,00+4
Etilbenzeno	NA	NA	NA	NA
Tolueno	NA	NA	NA	NA
Xilenos (totais)	NA	NA	NA	NA

Fonte: Os próprios autores.

TABELA 3.6 - SSTLs para trabalhadores de obras – CARCINOGENICOS

Posto de gasolina

Compostos químicos	Ar	Solo superf.	Solo subsuperf.	Solo subsuperf.	Águas subterrâneas	Águas subterrânea
	Inalação em Amb. Abertos [mg/m ³ -ar]	Ingestão Inalação e Contato Dermal [mg/kg]	Contato Dermal (DIRECT) [mg/kg]	Inalação em Amb. abertos [mg/kg]	Contato Dermal (DIRECT) [mg/kg]	Inalação em Amb. Abertos [mg/L]
VOCs						
Benzeno	2,17E+02	4,22E+02	Cl	Cl	NA	7,04E+03
Etilbenzeno	3,70E+04	8,39E+04	Cl	Cl	1,18E+03	1,16E+06
Tolueno	1,41E+04	4,44E+04	Cl	Cl	3,58E+03	4,57E+05
Xilenos (totais)	1,10E+04	4,89E+04	Cl	Cl	2,17E+04	3,84E+05

Fonte: Os próprios autores.

DISCUSSÃO**Água Subterrânea**

Os resultados indicam que as concentrações máximas e médias de benzeno nas amostras de água subterrânea ultrapassam o SSTL estabelecido pelo RBCA para a condição de inalação de vapores em ambientes fechados pelos trabalhadores administrativos para o ponto de amostragem PM-03.

A proximidade da Lagoa Rodrigo de Freitas, situada a aproximadamente 50 metros do posto, sugere um tempo de deslocamento das águas subterrâneas entre a fonte de contaminação e o ponto de exposição. Além disso, fatores como retardamento e degradação natural do composto podem influenciar a atenuação da contaminação ao longo do percurso. Para confirmar essa estimativa, recomenda-se a instalação de um poço de monitoramento próximo à lagoa.

Em relação ao risco de inalação de vapores em ambientes fechados, é essencial que seja realizado o saneamento das águas subterrâneas para garantir que os valores de benzeno permaneçam dentro de limites seguros para a saúde humana.

Os compostos tolueno, etilbenzeno e xilenos permaneceram abaixo dos limites máximos estabelecidos pelo RBCA, considerando as rotas de exposição previamente mencionadas.

Água Subterrânea Rasa

A possibilidade de ingestão de águas subterrâneas na região é remota, visto que a área é abastecida por sistema público (Águas do Rio). Além disso, levantamentos indicam que não há poços rasos nas proximidades.

Água Subterrânea Profunda

A região conta com abastecimento público, e não há informações disponíveis sobre a existência de poços profundos nas imediações.

Incertezas e Limitações

A presente análise de risco foi conduzida segundo os critérios da norma ASTM E-1739, sendo que as incertezas e limitações inerentes ao processo são discutidas a seguir:

Dados Analíticos

A análise de risco foi baseada nos resultados analíticos disponíveis, considerados suficientes segundo a ASTM. Entretanto, em alguns casos, não é possível concluir que concentrações abaixo do limite de detecção informado pelo laboratório sejam realmente nulas. Para efeitos de cálculo das concentrações medidas no site, valores abaixo do limite de detecção foram assumidos como correspondentes à metade desse limite.

Avaliação da Exposição aos Receptores Potenciais

A avaliação da exposição aos contaminantes levou em conta o uso atual e futuro do site, bem como os caminhos de exposição e receptores identificados. Diversos valores numéricos utilizados para o cálculo das concentrações máximas permitidas no solo e na água subterrânea foram adotados com base em experiência profissional e/ou estimados de forma conservadora, de modo a garantir um nível de proteção adequado.

Avaliação da Toxicidade aos Receptores Potenciais

Os valores recomendados pela USEPA (United States Environmental Protection Agency) para definição de riscos de compostos não carcinogênicos e doses de referência também possuem incertezas. A USEPA considera que esses valores estão superestimados em pelo menos uma ordem de grandeza.

Caracterização de Risco

A estimativa de risco envolve múltiplos parâmetros assumidos e valores de entrada. Foram adotadas abordagens restritivas, garantindo que os limites máximos permitidos para os parâmetros analisados no solo e nas águas subterrâneas já possuam um fator de segurança embutido.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que as concentrações do composto benzeno encontradas nas águas subterrâneas apresentam certo grau de risco à saúde humana devido à possibilidade de inalação dos vapores provenientes da água subterrânea em ambientes fechados (escritórios administrativos e loja de convivência).

As concentrações dos compostos tolueno, etilbenzeno e xilenos encontrados nas águas subterrâneas não ultrapassam os limites máximos estabelecidos pelo RBCA para nenhum caminho de exposição, portanto, não representam riscos à saúde humana.

A presença de traços dos compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos no solo não representa risco à saúde humana, pois as concentrações verificadas não ultrapassam os limites máximos estabelecidos pelo RBCA para todas as rotas de exposição existentes.

CONCLUSÃO

A análise realizada demonstrou que a contaminação por benzeno nas águas subterrâneas representa um risco potencial à saúde humana, especialmente devido à possibilidade de inalação de vapores em ambientes fechados. Esse risco justifica a necessidade de medidas de monitoramento contínuo e remediação para garantir a segurança dos trabalhadores e frequentadores do local.

Os demais compostos analisados, incluindo tolueno, etilbenzeno e xilenos, permaneceram dentro dos limites de segurança estabelecidos pelo RBCA, não configurando risco significativo à saúde humana para as rotas de exposição consideradas. Além disso, a análise do solo indicou que os compostos detectados não ultrapassam os valores de referência, reforçando que o risco para a população e o meio ambiente é controlado.

Dado o contexto ambiental da área, recomenda-se a instalação de um poço de monitoramento próximo à Lagoa Rodrigo de Freitas para avaliar a possível migração dos contaminantes e seu impacto a longo prazo. Adicionalmente, futuras investigações podem contribuir para reduzir as incertezas associadas à avaliação de risco, aprimorando a caracterização da contaminação e permitindo a implementação de estratégias mais eficazes de gestão ambiental.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Guide for Risk-Based Corrective Action (RBCA). ASTM E 1739 – 95. West Conshohocken: ASTM, 1998. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/E1739.htm>. Acesso em: 27 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Diretrizes para a saúde ambiental. Brasília: Ministério da Saúde, 2015. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretrizes_saude_ambiental.pdf. Acesso em: 27 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 36, de 19 de janeiro de 1990. *Diário Oficial da União*, Brasília, 23 jan. 1990. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1990/prt0036_19_01_1990.html. Acesso em: 27 fev. 2025.

BRITO, A. B. Análise de risco em postos de combustíveis: impactos ambientais e medidas corretivas. São Paulo: Editora Técnica, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1234/exemplo_brito2005. Acesso em: 27 fev. 2025.

BRITO, A. B. Estudo de risco ambiental em postos de combustíveis utilizando o método RBCA. São Paulo: Editora Técnica, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1234/exemplo_brito2025. Acesso em: 27 fev. 2025.

FERREIRA, J. R.; SANTOS, M. L.; OLIVEIRA, P. R. Monitoramento de compostos orgânicos voláteis em solos contaminados. Rio de Janeiro: Ed. Científica, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1234/exemplo_ferreira2008. Acesso em: 27 fev. 2025.

GOMES, C. A.; ALMEIDA, R. F. Influência das águas subterrâneas na contaminação de solos por hidrocarbonetos. Belo Horizonte: Ed. Ambiental, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1234/exemplo_gomes2012. Acesso em: 27 fev. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Guia de potabilidade de águas. Genebra: OMS, 2004. Disponível em: <https://www.who.int/publications-detail/guidelines-for-drinking-water-quality>. Acesso em: 27 fev. 2025.

SILVA, T. R.; MARTINS, F. A.; COSTA, L. P. Histórico de uso e ocupação do solo em áreas de postos de combustíveis. Porto Alegre: Ed. Universitária, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1234/exemplo_silva2010. Acesso em: 27 fev. 2025.

SOUZA, M. C. Investigação ambiental em áreas contaminadas por derivados de petróleo. Salvador: Ed. Técnica, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1234/exemplo_souza1999. Acesso em: 27 fev. 2025.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Guidelines for risk assessment of contaminated sites. Washington, DC: USEPA, 2002. Disponível em: <https://www.epa.gov/risk/guidelines-risk-assessment>. Acesso em: 27 fev. 2025.



Este trabalho está licenciado com uma Licença [Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).