

# ESTUDO DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE GÁS CLORO ( $Cl_2$ ) EM CASO DE ACIDENTE EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE UTILIZANDO O SOFTWARE ALOHA®<sup>1</sup>

Oziel da Silva Soares<sup>2</sup>

## RESUMO

Este estudo teve por objetivo analisar a dispersão atmosférica de gás cloro originada através de um vazamento hipotético em um cilindro de aço carbono, utilizado na estação de tratamento de água (ETA) do município de Cachoeirinha/RS. A fim de simular os cenários das dispersões, utilizou-se informações de domínio público, o software ALOHA® e o Google Maps 2021. Entre os cenários analisados, os resultados demonstraram que as plumas predominantes de nuvem tóxica, ocorreram na direção noroeste. A pluma de menor alcance foi 771 m (zona amarela; AEGL - 1 = 0,5 ppm), em contrapartida a maior, 8200 m (zona amarela; AEGL-1=0,5 ppm). Em ambos os casos as dispersões alcançariam residências, escolas, igrejas, empresas e pedestres. Concluiu-se com o estudo que estabelecer um plano de emergência divulgando à população vulnerável na zona vermelha (AEGL - 3 = 20 ppm) seria uma medida importante de prevenção.

**Palavras-chaves:** Dispersão atmosférica. Cloro. Estação de tratamento de água. ALOHA.

## ABSTRACT

This study aimed to analyze the atmospheric dispersion of chlorine gas originated through a hypothetical leak in a carbon steel cylinder used in the water treatment plant in the City of Cachoeirinha / RS. For this purpose, information from the public domain and the ALOHA® software and Google Maps 2021 were used, in order to simulate the dispersion scenarios. Among the analyzed scenarios, the results demonstrated that the predominant toxic cloud plumes occurred in the northwest direction. The plume with less range was 771 m (yellow zone; AEGL - 1 = 0.5 ppm), in contrast to the larger, 8200 m (yellow zone; AEGL-1 = 0.5 ppm). In both cases, the hypothetical dispersions would reach homes, schools, churches, businesses and pedestrians. Establishing a Emergency Response Program is also recommended in the red zone (AEGL - 3 = 20 ppm).

**KeyWords:** Atmospheric dispersion. Chlorine. Water treatment plant. ALOHA.

---

<sup>1</sup> Artigo de conclusão do curso de pós-graduação em Gestão Ambiental Industrial da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), Bento Gonçalves, RS. Orientador: Prof. Ma. Marlene Guevara dos Santos.

<sup>2</sup> Pós-graduando do curso de especialização em Gestão Ambiental Industrial da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS), Bento Gonçalves, RS. E-mail: oziel.rcf@gmail.com

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria química produz produtos químicos orgânicos e inorgânicos. Os produtos orgânicos são derivados de combustíveis fósseis como petróleo e gás. Já os produtos inorgânicos, em substâncias de origem mineral, como cloro, silício, soda cáustica e outras (PEREIRA; SILVA, 2014).

Muitas das substâncias químicas utilizadas e armazenadas em diversos tipos de instalações, tanto fábricas, comércio ou de serviços, são inflamáveis, explosivas e tóxicas. Devido a essas características sempre haverá o risco de acidentes. Quando ocorrem tais acidentes, o dano poderá ser catastrófico, podendo contribuir para que ocorram danos irreparáveis às empresas, trabalhadores locais, vizinhanças e meio ambiente.

Em dezembro de 2020, completou-se 35 anos do pior desastre industrial da história, pois em 1984, 40 toneladas de gás tóxico, isocianato de metila, vazaram da fábrica de pesticidas da Union Carbide Corporation, em Bhopal, Índia. O acidente provocou a morte de 8 mil pessoas, além de efeitos crônicos à saúde em mais de 200 mil pessoas (GUPTA; VARMA, 2020).

No Brasil, um dos maiores acidentes aconteceu também em 1984, na cidade de Cubatão, Estado de São Paulo. Nesse acidente, um vazamento de cerca de 700 mil litros de gasolina, em oleodutos que ligavam a Refinaria Presidente Bernardes de Cubatão (RPBC) ao terminal de portuário de Alemoa, causou um incêndio catastrófico na Vila São José, ocasionando a morte de 93 pessoas e a destruição de 470 casas (FILHO, 2015).

Conforme Matos (2009), os processos relacionados com GLP (gás liquefeito de petróleo), propano e cloro aparecem como os principais causadores de acidentes na indústria química global. Entre as principais razões para esses acidentes, Matos (2009) destaca as falhas mecânicas dos equipamentos e questões operacionais.

Entre as substâncias tóxicas, o cloro é uma das mais utilizadas na indústria química (COSTA, 2018). Os principais usos do cloro no consumo nacional são para a produção de dicloroetano (DCE), ácido clorídrico (HCl), hipoclorito de sódio (NaClO) e como agente desinfetante no tratamento de água (ABICLOR, 2020). No Brasil foram produzidas 857.297 toneladas de gás cloro em 2019, de uma capacidade instalada de 1.575.200 toneladas. No país existem 9 plantas produtivas de cloro que correspondem 60% do mercado latino americano (ABICLOR, 2020).

O cloro foi obtido pela primeira vez através do experimento do sueco Carl Wilhelm Scheele (1742-1786) em 1774, que percebeu um gás resultante de coloração amarelo esverdeado ao aquecer o ácido clorídrico com dióxido de manganês. No entanto a denominação "cloro" é creditada ao químico Humphry Davy, que em 1810 ao comprovar que o gás esverdeado era uma substância elementar, chamou-a de *Khloros*, que em grego significa amarelo esverdeado (COSTA, 2018).

Na teoria atômica clássica, o cloro elementar existe como uma molécula contendo dois átomos, cujo símbolo químico é Cl, possuindo peso atômico de 35,453 u, peso molecular de 70,906 u e número atômico 17. Seu ponto de ebulição na pressão atmosférica de 101,325 KPa é -33,97 °C, logo nas condições ambientais de 25 °C e 101,325 KPa, estará no estado gasoso. Devido a elevada reatividade, não é encontrado em seu estado natural, portanto sempre estará associado a outros elementos formando cloretos e cloratos (COSTA, 2018).

O gás cloro nas condições normais de pressão e temperatura (CNTP) possui densidade igual a 3,213 kg/m<sup>3</sup>. Em virtude disso, por ser mais pesado que o ar, cuja densidade é 1,21 kg/m<sup>3</sup> ao nível do mar a 21°C e pressão de 101,325 kPa, terá a

tendência natural de permanecer e se acumular ao nível do solo, formando uma nuvem de gás visível. Além disso, não é explosivo, nem inflamável, no entanto, ele poderá ser tóxico e irritante aos seres vivos, causando danos na pele, olhos e vias respiratórias. As consequências para saúde humana dependerão da concentração (ver tabela 1), tempo de exposição e suscetibilidade individual.

Tabela 1 - Efeitos à Saúde Humana

Concentração (ppm)	Efeitos à saúde
0,2 a 0,5	Nenhum efeito agudo ou crônico (limite olfativo)
1 a 3	Irritação branda da membrana mucosa, tolerada por até 1 hora
5 a 15	Irritação moderada do trato respiratório
30	Tosse intensa, imediata dor no peito, vômito, dispneia
34 a 51	Pode ser letal após 1,5 h de exposição
40 a 60	Pneumonite tóxica e edema pulmonar
100	Exposição letal após 50 min.
430	Exposição letal após 30 min.
1000	Fatal em alguns minutos

Fonte - Fontanive (2005); Chlorine Institute (2014)

No âmbito nacional o limite de exposição ocupacional ao gás cloro ( $Cl_2$ ) é definido pela Norma Regulamentadora 15 (NR 15), que em seu anexo 11, estabelece a concentração de 0,8 ppm como limite para uma jornada de trabalho de até 48 horas semanal.

Outros limites importantes a exposição ao gás cloro ( $Cl_2$ ) são o IDLH (*Immediately Dangerous to Health and Life*) e o AEGL (*Acute Exposure Guideline Levels*) (ver tabela 2), ambos limites podem ser expressos em ppm ou  $mg/m^3$ . O IDLH é o parâmetro para a toxicidade aguda mais importante em saúde ocupacional, foi estabelecido pela OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) e o NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) dos Estados Unidos em meados da década de 1970 (BUSCHINELLI; KATO,2012). O IDLH, representa a concentração da substância no ar ambiente a partir do qual há risco evidente de morte ou danos irreversíveis à saúde.

O AEGL foi desenvolvido em 1993 em ação conjunta de vários órgãos governamentais e não governamentais dos Estados Unidos, como a EPA (*Environmental Protection Agency*), o DOD (*Department of Defense*), o DOE (*Department of Energy*), o DOT (*Department of Transportation*) entre outros. O AEGL é indicado a população civil, ou seja, as comunidades que estão próximas a instalações que armazenam, utilizam e produzam substâncias extremamente perigosas em que há o risco de uma liberação acidental.

O AEGL é composto de três níveis de concentração; AEGL-1, AEGL-2, e AEGL-3, nos tempos de exposições 10 min, 30 min, 1 h, 4 h, e 8 h. O AEGL indica as concentrações de uma substância no ar ambiente, que podem causar diferentes tipos de danos à saúde em seres humanos desprovidos de qualquer tipo de proteção (NRC, 2004).

Tabela 2 - Concentração limite IDLH e AEGL para gás cloro (ppm)

Tempo de Exposição	IDLH		
-	10		
	AEGL 1	AEGL 2	AEGL3
10 minutos	0,5	2,8	50
30 minutos	0,5	2,8	28
60 minutos	0,5	2	20
4 horas	0,5	1	10
8 horas	0,5	0,71	7,1

Fonte - NRC (2004); Paul *et al.*(2014); NIOSH (2021)

A maior parte da produção de gás cloro é realizada industrialmente através da eletrólise de uma solução salina em processos com células de diafragma, mercúrio ou membrana. Em qualquer um destes processos, uma solução salina, cloreto de sódio (NaCl) ou cloreto de potássio (KCl) é eletrolisada resultando em subprodutos como: hidróxido de sódio (NaOH), Hidrogênio (H<sub>2</sub>) e Cloro (Cl<sub>2</sub>) ou hidróxido de potássio (KOH), Hidrogênio (H<sub>2</sub>) e Cloro (Cl<sub>2</sub>) (CHLORINE INSTITUTE, 2014).

Por questões econômicas o gás cloro é comercializado no estado líquido. A fim de que ocorra a mudança de fase, é necessário que o gás cloro passe primeiramente por uma etapa de compressão e posteriormente por sucessivas etapas de resfriamento (BRITO, 2009). Nacionalmente, o cloro é comercializado em cilindros pequenos (45, 50 e 68 Kg), grandes (900 e 1000 kg) e a granel com caminhão tanque (18 e 20 TON.).

De acordo com Fontanive (2005), apesar de todos os cuidados possíveis, não é incomum ocorrerem acidentes e falhas mecânicas na utilização do gás cloro. No Brasil acidentes com gás cloro têm sido recorrentes. Em 2011, em uma fábrica na cidade de Nova Santa Rita, no Estado do Rio Grande do Sul, um funcionário veio a óbito após inalar gás cloro. O acidente ocorreu, quando a vítima estava realizando uma intervenção de manutenção (OPERÁRIO..., 2011).

No ano de 2017, um estudante passou mal ao inalar gás cloro depois que um acidente em uma válvula causou um vazamento na Estação de Tratamento de Água (ETA) do Bairro Serraria em Guajará-Mirim (RO), a escola estava localizada nas proximidades da ETA (FREITAS, 2017). Já em 2018, um vazamento de gás cloro, provocou a evacuação da ETA Sete Lagoas, na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Um cilindro de 700 kg de gás cloro, apresentou defeitos e começou a vazar (FRANCO, 2018). No final de 2020, mais um vazamento de gás cloro ocorreu. Uma falha de vedação em um cilindro que continha 300 kg de gás cloro, provocou a evacuação da ETA do Cubatão, localizada na cidade de Joinville, Estado de Santa Catarina (MORRIESEN, 2020).

Em virtude dos riscos oferecidos pelo uso do gás cloro, têm havido um aumento no interesse de empresas de saneamento e outros segmentos industriais por alternativas mais seguras (GARCIA, 2018). No entanto, a aprendizagem dos acidentes e a avaliação adequada do risco têm sido a solução proposta para que as indústrias e instalações químicas continuem com a utilização de substâncias químicas perigosas de forma mais prudente. Nesse sentido, a quantificação e a avaliação das consequências dos acidentes é importante para prever e prevenir os efeitos danosos

desses eventos (SETARESHENAS *et al.*, 2013).

Logo, estimar e analisar as áreas vulneráveis e afetadas de um possível acidente, é necessário para uma adequada avaliação de risco. Em geral, a extensão da região vulnerável dependerá do tipo de substância, da quantidade de material liberado, da densidade, da volatilidade e das condições atmosféricas como a direção e velocidade do vento, umidade do ar, temperatura ambiente, entre outros (LOPES *et al.*, 2016).

Na atualidade, alguns softwares por meio de simulações numéricas computacionais, utilizando parâmetros como: a direção e velocidade dos ventos, temperatura do ar atmosférico, índice de nebulosidade, umidade relativa do ar, topografia entre outros, têm facilitado a análise das áreas vulneráveis e afetadas, geradas nas dispersões acidentais de gases tóxicos.

Entre eles, o ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*) um software de domínio público, que foi desenvolvido pelo NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e a EPA, cujo objetivo é modelar nuvens de gases tóxicos, incêndios e explosões a fim de prever as áreas de riscos originadas (JONES *et al.*, 2013).

Em consequência do crescente número de estações de tratamento de água (ETA) que têm buscado outras tecnologias de desinfecção, com maior segurança operacional e ambiental, tendo em vista, a proximidade de residências, comércios, escolas, igrejas, empresas e pedestres (GARCIA, 2018), objetivou-se nesse estudo analisar quais seriam as áreas vulneráveis e afetadas, obtidas na dispersão de um vazamento hipotético de cloro, em uma ETA que continua utilizando o cloro gasoso em seu processo.

Para tanto foram considerados seis cenários distintos de vazamentos, em que o gás cloro, está sob estado liquefeito em um cilindro de capacidade 900 kg. O vazamento ocorrerá em um único cilindro e a dispersão gerada será modelada com o software ALOHA versão 5.4.7.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este estudo teve por objetivo analisar a dispersão atmosférica hipotética de gás cloro armazenado em um cilindro de aço carbono, que é utilizado na etapa de desinfecção da estação de tratamento de água (ETA) da cidade de Cachoeirinha/RS. Para tanto, utilizou-se de informações de domínio público, como publicações acadêmicas e oficiais além de manuais técnicos, afim de caracterizar o local da dispersão, definir as características físico químicas do gás cloro, definir as variáveis meteorológicas e especificar as dimensões técnicas do cilindro.

O vazamento e a dispersão foram modelados utilizando o software ALOHA 5.4.7, tendo a projeção das zonas de riscos geradas através do *Google Maps*, 2021. A simulação do vazamento ocorrerá em apenas um cilindro, que se encontra ao nível do solo na posição horizontal. Além disso, para essa análise não foi considerado a atuação ou o funcionamento de quaisquer meios mitigadores de possíveis vazamentos.

### **2.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA ETA**

A ETA Cachoeirinha R/S, está localizada no centro do município. A cidade de Cachoeirinha fica a 11 km da capital do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, e a sua população estimada é de 131.240 habitantes (IBGE, 2020). O município tem uma área

de 43,77 km<sup>2</sup> e faz divisa ao norte com Sapucaia do Sul e Esteio, ao Sul com Alvorada e Porto Alegre, a leste com Gravataí e a oeste com Canoas. A cidade localiza-se a uma latitude de 29°57'03" sul e longitude de 51°05'38" oeste, estando o município a uma altitude de 10 m em relação ao nível do mar (PROSINOS, 2014).

Esta ETA, é do tipo convencional e foi projetada para trabalhar com uma vazão mínima de 550 L/s e máxima de 1000 L/s (FREITAS, 2011). A ETA está localizada a uma latitude de 29°57'16" sul e longitude de 51°05'35" oeste (ver figura 1), a mesma é envolta por um misto de estabelecimento comerciais, edificações residenciais e uma escola de ensino médio.

A captação da água bruta que abastece a ETA, é obtida através de dois mananciais superficiais, o Arroio das Garças no município de Canoas e a lagoa de pré-tratamento junto ao rio Gravataí, município de Porto Alegre. A ETA Cachoeirinha realiza as seguintes etapas no tratamento da água bruta: pré-desinfecção, coagulação, floculação, decantação, filtração, fluoretação e pós-desinfecção (FREITAS, 2011).

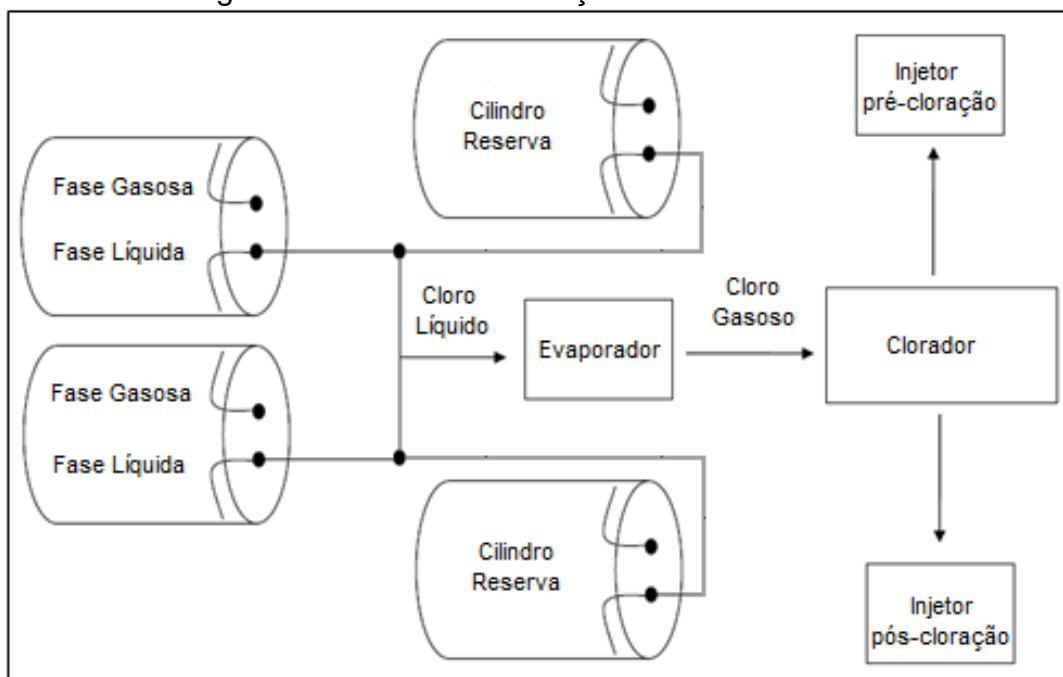
Para a fase de clarificação da água bruta é utilizado sulfato de alumínio, (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) como agente coagulante e hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), como neutralizante. A fluoretação é realizada com adição de ácido fluossilícico (H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>). Na fase de desinfecção é utilizado o cloro (Cl<sub>2</sub>) (FREITAS, 2011). A aplicação de cloro, é realizada através de um sistema fechado de cloração (ver figura 2). De acordo com Freitas (2011), esse sistema é composto de evaporador, clorador, injetores e 4 cilindros com capacidade de 900 Kg de cloro, sendo 2 usados no processo e 2 reservas.

Figura 1 - ETA Cachoeirinha



Fonte - Google Maps (2021)

Figura 2 - Sistema de cloração ETA Cachoeirinha



Fonte - Adaptado de Freitas (2011)

## 2.2 DADOS QUÍMICOS, LIMITES DE EXPOSIÇÃO E DADOS DIMENSIONAIS

As principais propriedades químicas do cloro, limites de exposição e dados dimensionais do cilindro utilizados nesse estudo estão apresentados na tabela 3.

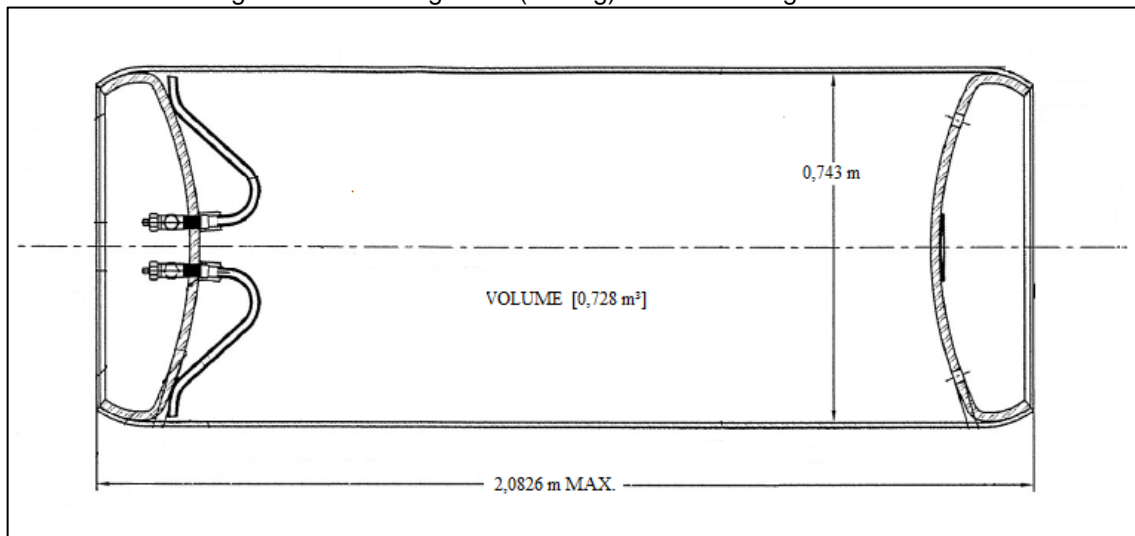
Tabela 3 - Dados químicos

Número CAS (Chemical Abstracts Service)	7782-50-5
Peso molecular	70,91 g/mol
IDLH	10 ppm
AEGL-1; 2; 3 (1h)	0,5 ppm; 2 ppm; 20 ppm
Diâmetro interno do cilindro	0,743 m
Volume interno do cilindro	0,728 m <sup>3</sup>
Massa de cloro	900 Kg
Temperatura do cloro	-12 °C

Fonte - ALOHA 5.4.7 (2021); Fontanive (2005); NIOSH (2021); NRC (2004)

Na figura 3, é apresentado o formato dimensional do cilindro com capacidade de armazenagem de 900 kg de armazenagem de cloro, utilizado na ETA Cachoeirinha.

Figura 3 - Cilindro grande (900 kg) de Armazenagem de cloro



Fonte - Adaptado HIDROMAR (2015)

### 2.3 DADOS METEOROLÓGICOS

As condições atmosféricas (ver tabela 4), foram obtidas através do site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), referente ao ano de 2020. Sendo utilizados os dados climáticos da estação meteorológica de Porto Alegre. Utilizou-se as condições atmosféricas de Porto Alegre por ser um município limítrofe a Cachoeirinha e devido à dificuldade de obter dados oficiais e atualizados do município em estudo.

Tabela 4 - Dados Climáticos

Temperatura média do ar	19,98 °C
Umidade média relativa do ar	74,34 %
Velocidade média do vento	1,55 m/s
Orientação média do Vento	161,95 ° (su-sudeste /SSE)

Fonte - INMET (2020)

Na caracterização da classe de estabilidade atmosférica (ver tabela 5) baseado no método Pasquill (1961), adotou-se as classes A, B e F, por serem as condições climáticas predominantes de Porto Alegre (NÉRIS et al., 2016). Neste estudo não foi considerado a influência de inversões térmicas, em virtude de que as dispersões gás cloro tendem a permanecer próximo ao solo.



Tabela 5 - Classes de estabilidade de Pasquill

Classe A: extremamente instável		Classe D: neutra			
Classe B: moderadamente instável		Classe E: levemente instável			
Classe C: levemente instável		Classe F: Estável			
Velocidade	Dia			Noite	
à 10 m	Insolação Solar			Nebulosidade	
m/s	Forte	Moderada	Fraca	>50%	<50%
< 2	A	A - B	B	E	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Fonte - Jones *et al.* (2013)

A classe de estabilidade de Pasquill é um parâmetro fundamental na capacidade de dispersão atmosférica, sendo divididas em seis diferentes categorias. Conhecendo-se a velocidade do vento, a insolação solar (ver tabela 6), a nebulosidade e o período, é possível definir a classe. Na classe A, a forma da dispersão será irregular, o alcance da pluma será menor, porém com largura maior. Por outro lado, na classe F o alcance será maior e a largura da pluma mais reduzida (FONTANIVE, 2005).

Tabela 6 - Insolação solar em função da radiação solar incidente

Insolação Solar		
Forte	Moderada	Fraca
> 851 W/m <sup>2</sup>	851 – 526 W/m <sup>2</sup>	< 526 W/m <sup>2</sup>

Fonte - Jones *et al.* (2013)

## 2.4 PROGRAMA ALOHA

A fim de simular o vazamento e a dispersão de gás cloro, foi utilizado o programa de domínio público ALOHA, versão 5.4.7. Esse programa é apropriado para ser utilizado em simulações de resposta rápida a emergência, devido a isso requer poucos dados de entrada e apresenta os resultados rapidamente. O ALOHA é capaz de simular dispersões, incêndios e explosões em aproximadamente 900 tipos de substâncias, porém limitado a simulações cuja duração da fonte seja superior a 1 min e inferior a 60 min.

Em relação a vazamentos, o ALOHA pode simular até quatro tipos de fontes: fonte direta (*source direct*), poças (*puddle*), vasos de pressão (*tanks*) e gasodutos (*gas pipeline*) (JONES *et al.*, 2013).

Já para as dispersões, o ALOHA é capaz de simular tanto gases leves como pesados. As simulações são baseadas em dois modelos matemáticos. O modelo Gaussiano desenvolvido por Palazzi (PALAZZI *et al.*, 1982), usado para simulação de

gases leves e o modelo *Heavy Gas*, baseado no modelo DEGADIS (*Dense Gas Dispersion*) de Spicer and Havens (SPICER; HAVENS, 1989), para gases pesados (JONES et al., 2013).

No modelo de Palazzi as concentrações do contaminante são descritas conforme a equação 1. Este modelo descreve o comportamento de dispersões, cujas liberações são de curta duração e em regime permanente (JONES et al.,2013).

$$C(x, y, z, t) = \begin{cases} \frac{\chi}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x-Ut}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) \right] & (t \leq t_r) \\ \frac{\chi}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x-U(t-t_r)}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x-Ut}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) \right] & (t_r < t < \infty) \end{cases} \quad (1)$$

Em que  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são os parâmetros de dispersão;  $t_r$  é o tempo de duração do vazamento e  $U$  variável relacionada com o vento. O termo  $\chi$  (ver equação 2) representa uma distribuição de Gauss a partir de uma fonte pontual bem conhecida e em estado estacionário (HANNA et al., 1982).

$$\chi(x, y, z, t) = \left( \frac{Q(t)}{U} \right) g_y(x, y) g_z(x, z) \quad (2)$$

Onde,  $Q(t)$  é taxa de liberação da fonte e  $g_y$  é obtido através da equação 3.

$$g_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2 \right] \quad (3)$$

E, quando não há inversão,  $g_z$  é obtido através da equação 4. Em que,  $h_s$  é a altura da liberação.

$$g_z(x, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z(x)} \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-h_s}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+h_s}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

Em relação ao modelo *Heavy gas*, as concentrações do poluente são descritas através da equação 5. Nesse modelo a pluma é assumida ser composta de um núcleo homogêneo horizontal de largura  $2b$  e extremidades em forma gaussiana (JONES et al.,2013).

$$C(x, y, z, t) = \begin{cases} c_c(x) \exp \left[ \left( -\frac{|y|-b_x}{s_y(x)} \right)^2 - \left( \frac{z}{s_z} \right)^{1+n} \right] & |y| > b_x \\ c_c(x) \exp \left[ -\left( \frac{z}{s_z} \right)^{1+n} \right] & |y| \leq b_x \end{cases} \quad (5)$$

Onde,  $c_c$  é a concentração no eixo central da pluma,  $s_y$  e  $s_z$  são os parâmetros de dispersão lateral e vertical,  $b$  a metade da largura do núcleo homogêneo e  $n$  são valores típicos relacionados com a classe de estabilidade de Pasquill.

O alcance das dispersões de gases tóxicos é representado através de duas áreas. A área vulnerável e a afetada. A área vulnerável representa a região em que há probabilidade de alcance da nuvem tóxica, conforme a direção do vento. Já a zona afetada, representa a pluma tóxica gerada conforme o vento predominante.

O ALOHA classifica as áreas vulneráveis e afetadas em três zonas de perigo (vermelha, laranja e amarela), sendo que a zona vermelha é o pior caso e representa

a região mais crítica a saúde humana, nela poderá haver mortes e efeitos irreversíveis a saúde. A zona laranja indica consequências graves, de efeitos agudos e crônicos, porém reversíveis e a zona amarela, a possibilidade de efeitos leves como, tosse e algum desconforto que cessam após o fim da exposição (NRC, 2004). Por padrão, o ALOHA para gases tóxicos, representa as zonas de perigo (vermelha, laranja e amarela), conforme a intensidade das concentrações estabelecidas no AEGL para o período de 60 minutos.

A fim de realizar as simulações neste estudo, foram adotados o vazamento da fonte como *tanks* e o *heavy gas* como modelo matemático da dispersão.

## 2.5 DADOS DE ENTRADA NO PROGRAMA ALOHA

Na tabela 7 estão sistematizadas as informações, acerca da localização geográfica da ETA Cachoeirinha, condições meteorológicas, número CAS da substância e características técnicas da fonte, necessárias para execução das simulações.

Tabela 7 - Sistematização dos dados de entrada

Localização geográfica (Latitude)	29°57'15,85"
Localização geográfica (Longitude)	51°05'35"
Substância	Cloro – CAS 7782-50-5
Classe de estabilidade atmosférica	A – B - F
Temperatura média do ar	19,98 °C
Umidade média relativa do ar	74,34 %
Velocidade média do vento	1,55 m/s
Orientação média do Vento	161,95 ° (su-sudeste /SSE)
Rugosidade do terreno	ALOHA - Urbana ( <i>urban or forest</i> )
Diâmetro interno do cilindro	0,743 m
Volume interno do cilindro	0,728 m <sup>3</sup>
Massa de cloro	900 Kg
Temperatura do cloro	-12 °C
Diâmetro do orifício	0,008 m
Altura do orifício de vazamento (líquido)	0 m
Altura do orifício vazamento (gás)	0, 743 m
Modelo matemático de vazamento	ALOHA - <i>Tanks</i>
Modelo matemático de dispersão	ALOHA - Gás pesado ( <i>Heavy gás</i> )

Fonte - Google Maps (2021); Nêris *et al.* (2016); INMET (2020); Fontanive (2005); Hidromar (2015)

## 2.6 CENÁRIOS HIPOTÉTICOS ANALISADOS

Foram considerados seis cenários hipotéticos (ver tabela 8), sendo utilizadas duas variáveis: classe de estabilidade atmosférica e altura do orifício de vazamento. Cada cenário teve em comum os demais dados apresentados na tabela 7. No cenário 1, foi considerado a classe de estabilidade atmosférica A e altura do vazamento a 0 m, na válvula de estado líquido. No cenário 2, foi considerado a classe de estabilidade A, porém com a altura do vazamento a 0,743 m, na válvula do estado gasoso.

No cenário 3, foi considerado a classe de estabilidade atmosférica B, com a altura de vazamento do cloro a 0 m. No cenário 4, a altura do vazamento ocorreu a 0,743 m com a mesma classe de estabilidade do cenário anterior. Nos cenários 5 e 6, foram utilizados a classe de estabilidade atmosférica F, com os vazamentos ocorrendo a 0 m e 0,743 m.

Tabela 8 - Parâmetros e cenários analisados

Variável	Cenários de simulação hipotéticos					
	1	2	3	4	5	6
Classe de estabilidade atmosférica	A	A	B	B	F	F
Altura do orifício de vazamento (m)	0	0,743	0	0,743	0	0,743

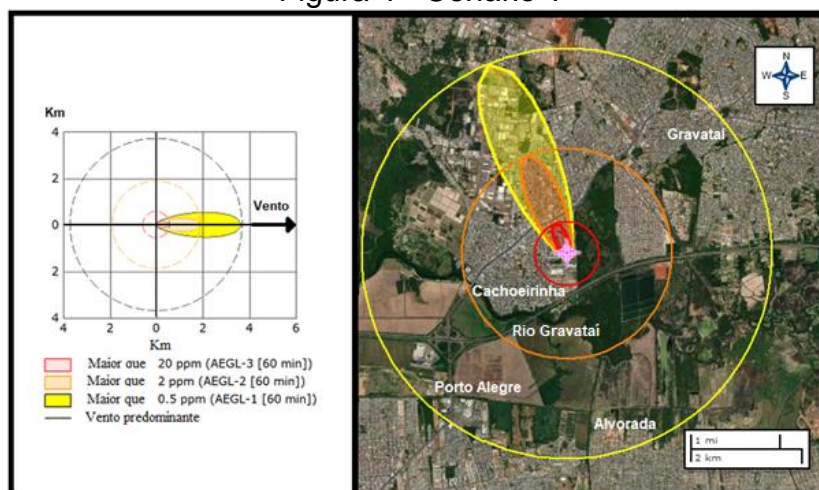
Fonte - Dados do autor (2021)

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No cenário 1 (ver figura 4 e anexo A), a liberação do cloro, ocorre em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 24 min e vazão média de 38,9 Kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 576 m de comprimento e 231,6 m de largura (concentração  $\geq 20$  ppm), zona laranja de 1900 m de comprimento e 583 m de largura (concentração  $\geq 2$  ppm) e zona amarela de 3700 m de comprimento e 1050,2 m de largura (Concentração  $\geq 0,5$  ppm).

As áreas vulneráveis, geradas a partir da fonte no cenário 1, são: círculo vermelho (diâmetro 1152 m) (concentração  $\geq 20$  ppm), círculo laranja (diâmetro 3800 m) (concentração  $\geq 2$  ppm) e círculo amarelo (diâmetro 7400 m) (concentração  $\geq 0,5$  ppm).

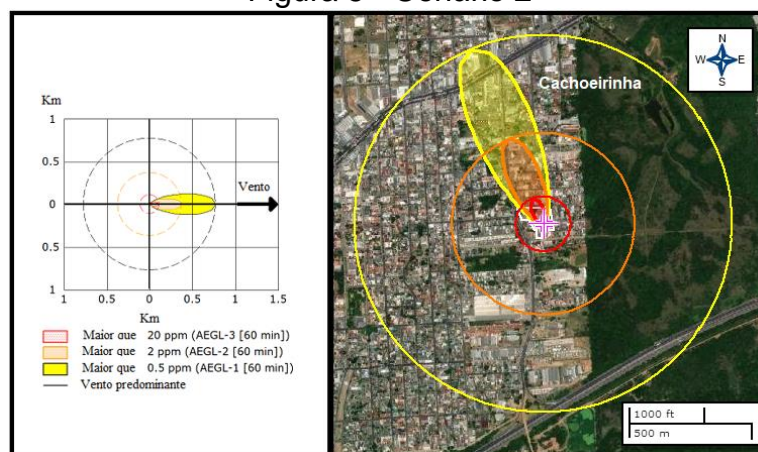
Figura 4 - Cenário 1



Fonte - ALOHA 5.4.7 (2021); Google Maps (2021)

No cenário 2 (ver figura 5 e anexo B), a liberação do cloro ocorre em estado gasoso, excedendo a 60 min, com vazão de 1,69 Kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 112 m de comprimento e 47,1 m de largura (concentração  $\geq 20$  ppm), zona laranja de 373 m de comprimento e 127,6 m de largura (concentração  $\geq 2$  ppm) e zona amarela de 771 m de comprimento e 240,5 m de largura (Concentração  $\geq 0,5$  ppm). As áreas vulneráveis geradas a partir da fonte, são: círculo vermelho (diâmetro 224 m) (concentração  $\geq 20$  ppm), círculo laranja (diâmetro 746 m) (concentração  $\geq 2$  ppm) e círculo amarelo (diâmetro 1542 m) (concentração  $\geq 0,5$  ppm).

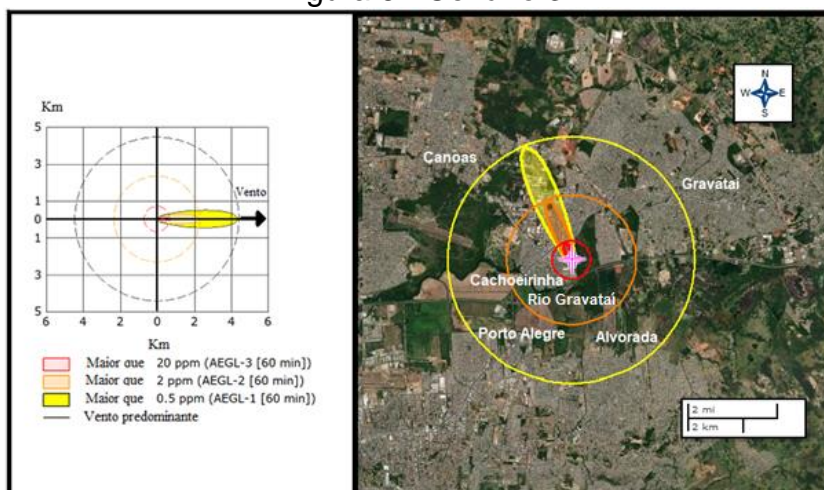
Figura 5 - Cenário 2



Fonte - ALOHA 5.4.7 (2021); Google Maps (2021)

No cenário 3 (ver figura 6 e anexo C), a liberação do cloro, ocorre em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 24 min e vazão de 38,9 Kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 690 m de comprimento e 225,4 m de largura (concentração  $\geq 20$  ppm), zona laranja de 2300 m de comprimento e 532 m de largura (concentração  $\geq 2$  ppm) e zona amarela de 4400 m de comprimento e 934 m de largura (Concentração  $\geq 0,5$  ppm). As áreas vulneráveis no cenário 3, são: círculo vermelho (diâmetro 1380 m) (concentração  $\geq 20$  ppm), círculo laranja (diâmetro 4600 m) (concentração  $\geq 2$  ppm) e círculo amarelo (diâmetro 8800 Km) (concentração  $\geq 0,5$  ppm).

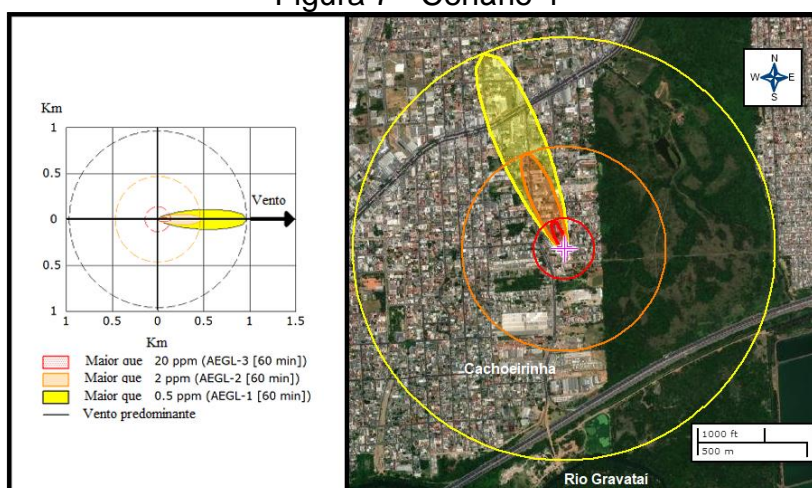
Figura 6 - Cenário 3



Fonte - ALOHA 5.4.7 (2021); Google Maps (2021)

No cenário 4 (ver figura 7 e anexo D), a liberação do cloro ocorre em estado gasoso, com duração superior a 60 min e vazão mássica média de 1,69 Kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 139 m de comprimento e 41,8 m de largura (concentração  $\geq 20$  ppm), zona laranja de 467 m de comprimento e 113 m de largura (concentração  $\geq 2$  ppm) e zona amarela de 965 m de comprimento e 212,4 m de largura (Concentração  $\geq 0,5$  ppm). As áreas vulneráveis geradas a partir da fonte são: círculo vermelho (diâmetro 278 m) (concentração  $\geq 20$  ppm), círculo laranja (diâmetro 934 m) (concentração  $\geq 2$  ppm) e círculo amarelo (diâmetro 1930 m) (concentração  $\geq 0,5$  ppm).

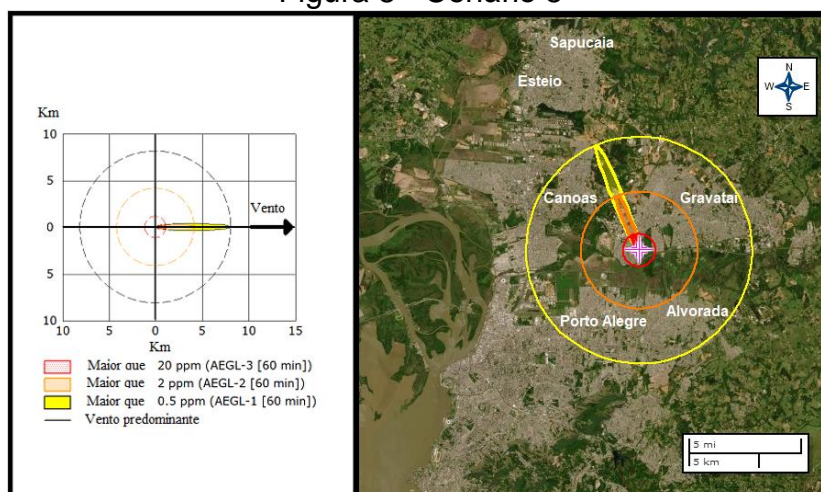
Figura 7 - Cenário 4



Fonte - ALOHA 5.4.7 (2021); Google Maps (2021)

No cenário 5 (ver figura 8 e anexo E), a liberação do cloro, ocorre em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 24 min e vazão média de 38,9 Kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 1200 m de comprimento e 302,4 m de largura (concentração  $\geq 20$  ppm), zona laranja de 4200 m de comprimento e 535,2 m de largura (concentração  $\geq 2$  ppm) e zona amarela de 8200 m de comprimento e 760 m de largura (Concentração  $\geq 0,5$  ppm). As áreas vulneráveis no cenário 3, são: círculo vermelho (diâmetro 2400 m) (concentração  $\geq 20$  ppm), círculo laranja (diâmetro 8400 m) (concentração  $\geq 2$  ppm) e círculo amarelo (diâmetro 16400 m) (concentração  $\geq 0,5$  ppm).

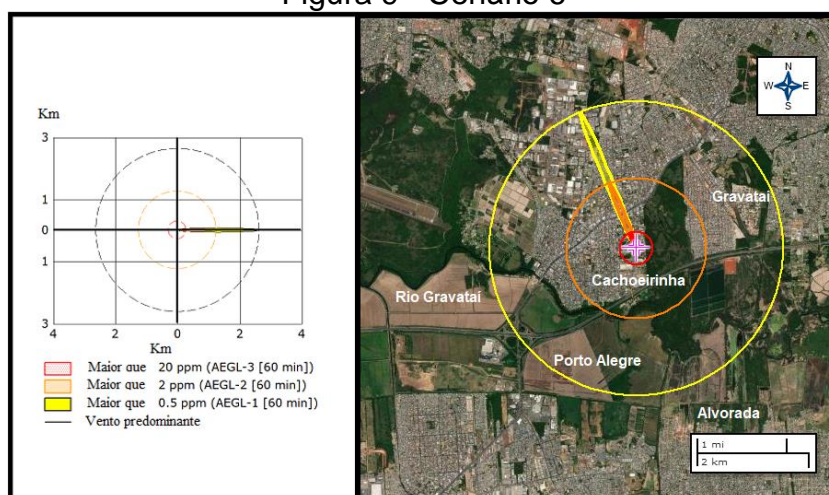
Figura 8 - Cenário 5



Fonte - ALOHA 5.4.7 (2021); Google Maps (2021)

No cenário 6 (ver figura 9 e anexo F), a liberação do cloro ocorre em estado gasoso e vazão média de 1,69 Kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 291 m de comprimento e 42,8 m de largura (concentração  $\geq 20$  ppm), zona laranja de 1300 m de comprimento e 87,2 m de largura (concentração  $\geq 2$  ppm) e zona amarela de 2600 m de comprimento e 142,38 m de largura (Concentração  $\geq 0,5$  ppm). As áreas vulneráveis geradas a partir da fonte são: círculo vermelho (diâmetro 582 m) (concentração  $\geq 20$  ppm), círculo laranja (diâmetro 2600 m) (concentração  $\geq 2$  ppm) e círculo amarelo (diâmetro 5200 m) (concentração  $\geq 0,5$  ppm).

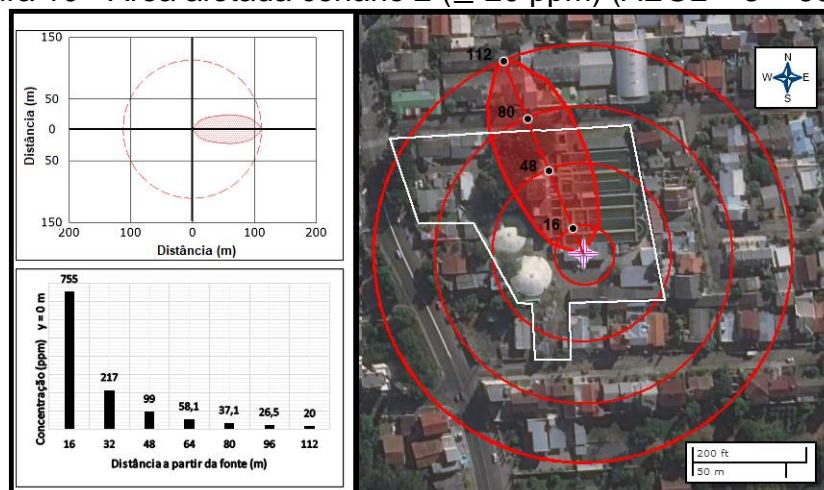
Figura 9 - Cenário 6



Fonte - ALOHA 5.4.7 (2021); Google Maps (2021)

Na figura 10, é apresentado a menor área afetada e vulnerável (AEGL – 3 = 60 min), em relação aos cenários analisados. A partir da fonte, a pluma gerada percorre uma distância máxima de 112 m, com concentrações de cloro superior a 20 ppm. As maiores concentrações encontram-se próxima a fonte e no eixo central a favor do vento predominante. Em consequência disso, os trabalhadores da ETA, a população circunvizinha e os pedestres, seriam os mais vulneráveis ao risco à vida e efeitos irreversíveis a saúde.

Figura 10 - Área afetada cenário 2 ( $\geq 20$  ppm) (AEGL – 3 = 60 min)



Fonte - ALOHA 5.4.7 (2021); Google Maps (2021)

Entre os cenários analisados, observou-se que as áreas afetadas e vulneráveis variaram conforme a classe de estabilidade atmosférica. As classes de estabilidade mais instáveis como A e B (cenários 1, 2, 3 e 4), tiveram o comprimento da pluma menor se comparada a classe F (cenários 5 e 6), classe mais estável, cujo comprimento foi maior. De acordo com Fontanive (2005), isso é justificado pelo fato de que quanto mais instável for a condição atmosférica, maiores serão as turbulências atmosféricas, logo mais diluída será a nuvem de gás tóxico.

O cenário 2, apresentou a menor distância de dispersão a partir da fonte (771 m) (concentração  $\geq 0,5$  ppm), em contrapartida ao cenário 5, com a maior (8200 m) (concentração  $\geq 0,5$  ppm). Nos cenários 1, 3 e 5, observou-se que conforme a orientação do vento predominante, além de Cachoeirinha outros municípios como Alvorada, Canoas, Gravataí e Porto Alegre, poderiam ter regiões afetadas pelas dispersões do gás cloro.

As vazões mássicas oriundas das liberações do cilindro (cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6), no estado bifásico (gás e aerossol) e gasoso não sofreram alterações conforme a mudança das classes de estabilidade atmosférica, corroborando com estudo similar de Lopes et al. (2016) que apontou somente três variáveis significativas na variação da vazão de saída: volume da substância no interior do cilindro, altura e diâmetro do orifício de vazamento.

As liberações no estado bifásico (gás e aerossol), (cenários 1, 3 e 5) geraram plumas tóxicas que alcançaram distâncias maiores se comparadas as liberações no estado gasoso (cenários 2, 4 e 6). Resultado esperado em virtude das vazões de saída, pois no estado bifásico (cenários 1, 3 e 5) as vazões médias (38,9 kg/min) foram superiores as vazões médias (1,64 kg/min) do estado gasoso (cenários 2, 4, e 6).

Em todos os cenários analisados, os resultados demonstram que as dispersões alcançariam áreas residências e industriais de Cachoeirinha e municípios circunvizinhos. Nesses cenários, residências, escolas, igrejas, empresas, trabalhadores e pedestres estariam expostos a concentrações de gás cloro, prejudiciais à saúde e a vida.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O cloro é uma substância química muito utilizado nos dias atuais, de agente de desinfecção a produção de inúmeros compostos plásticos, tem aplicações muito diversificadas na sociedade atual, porém devido a sua toxicidade, deverá ser produzido e manipulado atendendo aos critérios de segurança estabelecidos em legislação local.

Com a utilização do programa ALOHA, foi possível estimar zonas de perigo de acordo com a classificação AEGL (60 min). Em virtude disso, a análise e avaliação dos resultados propostos é relevante, pois poderá contribuir na fomentação da análise dos riscos inerente a atividade e na tomada de decisão da companhia de abastecimento em relação a segurança da instalação e população circunvizinha.

Na análise dos cenários, observou-se que conforme os parâmetros estabelecidos, o alcance máximo das nuvens de gás cloro foi de 8200 m, representado através do cenário 6. Nesse cenário certas regiões dos municípios de Alvorada, Canoas, Gravataí e Porto Alegre, além de Cachoeirinha estariam na área vulnerável de risco. O alcance mínimo foi de 771 m, representado através do cenário 2. Nesse cenário, somente o município de Cachoeirinha estaria na área vulnerável de risco.

As zonas AEGL- 3 e AEGL - 2 previstos nos cenários analisados, são os locais mais críticos a manutenção da saúde e a vida, logo os resultados apresentados



poderão contribuir tanto à empresa, na eficácia de seus programas de prevenção como a comunidade local, na compreensão do risco e na criação de um diálogo com as partes interessadas.

No entanto, apesar das zonas AEGL - 3 e 2, projetarem os piores cenários de riscos à saúde, não se deve descartar os cenários estimados no AEGL - 1, pois apesar das concentrações do gás cloro estarem entre 0,5 e 2 ppm, deve ser levado em consideração a suscetibilidade individual de cada pessoa.

É sugerido que a população próxima a ETA Cachoeirinha, localizados na área vulnerável AEGL - 3, deveria ser informada quanto ao risco oferecido pela instalação e capacitados na identificação e evacuação de uma possível situação emergencial, logo estabelecer um plano de emergência com a população dessa zona seria uma medida útil de prevenção.

Entretanto, os resultados devem ser analisados de forma criteriosa e conservadora, pois o programa possui limitações em levar em consideração a influência do tipo de terreno e possíveis edificações que podem mudar a direção e a velocidade do vento, alterando o formato final da pluma. Em virtude da limitação em considerar o tipo de terreno, é possível que as áreas não urbanizadas entre Cachoeirinha e os municípios vizinhos, além do Rio Gravataí, sirvam como barreira natural na dispersão do gás cloro, limitando o alcance da nuvem tóxica aos municípios vizinhos.

Além disso, deve ser levado em consideração a limitação do modelo matemático utilizado, pois é uma simplificação dos fenômenos naturais complexos e processos reais ocorridos. Em virtude disso, o programa ALOHA, deverá ser utilizado somente em função de sua finalidade principal, a de respostas rápidas a emergência, logo o mesmo não é indicado para uma análise mais complexa em que seja necessária uma modelagem com melhor representação do fenômeno físico e considerações de possíveis obstáculos.

Assim, para uma análise mais complexa é recomendável o uso de outras ferramentas. No entanto, apesar dos resultados obtidos serem conservadores, são úteis, pois permitem serem estimadas as possíveis zonas de riscos geradas através das dispersões do gás cloro.

## REFERÊNCIAS

ABICLOR. **Relatório estatístico janeiro/dezembro 2019**. Disponível em: <<http://www.abiclor.com.br/novo/wp-content/uploads/2020/06/Abiclor-Relatorio-Estatistico-2019b.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

BRITO, Karoline Dantas. **Avaliação do comportamento dinâmico de uma unidade de compressão de cloro**. 2009, 56p. Dissertação - Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Disponível em: <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&c\\_o\\_obra=160845](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&c_o_obra=160845)>. Acesso em: 10 mar. 2021.

BUSCHINELLI, José Tarcísio; KATO, Mina. **Manual para Interpretação de Informações sobre substância químicas**. São Paulo: Fundacentro, 2011, 62p.

CHLORINE INSTITUTE. **Panfleto 1: Cloro básico**. Tradução e adaptação clorosur. 8 ed. 2014. Disponível em: <<http://clorosur.org/wp-content/uploads/2015/04/Panfleto01-port.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

COSTA, Airton Miguel Comassetto. **Avaliação de risco do gás cloro na estação de tratamento de água de Caçapava do Sul - RS.** 2018. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2018. Disponível em: <<http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/handle/riu/3472>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

FILHO, Clayton Barbosa Ferreira. **A (toxi)cidade de Cubatão: História Ambiental, desastres tecnológicos e a construção do imaginário ambiental da cidade tóxica na década de 1980.** 2015, 114p. Dissertação - Mestrado em História - Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná, Irati, 2015. Disponível em:<[http://www2.unicentro.br/ppgh/files/2015/07/Disserta\\_o\\_de\\_Clayton\\_Barbosa\\_Ferreir\\_a\\_Filho\\_56339fb690c7b.pdf](http://www2.unicentro.br/ppgh/files/2015/07/Disserta_o_de_Clayton_Barbosa_Ferreir_a_Filho_56339fb690c7b.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2021.

FONTANIVE, Sílvia. **Estudo de análise de risco do cloro em estações de tratamento de água.** 2005, 182p. Dissertação - Mestrado em Engenharia de Processos Químicos - Universidade federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em:<<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/10309>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

FRANCO, Daniele. Vazamento de gás cloro evacua estação de tratamento de água em Sete Lagoas. **HOJE EM DIA**, 20 jul. 2018. Disponível em: <<https://www.hojeemdia.com.br/horizontes/cidades/vazamento-de-g%C3%A1s-cloro-evacua-esta%C3%A7%C3%A3o-de-tratamento-de-%C3%A1gua-em-sete-lagoas-1.641441>>. Acesso em: 12 jun. 2021

FREITAS, Daniela de Bacco. **Estudos de melhorias dos sistemas de cloração da água de abastecimento na Corsan pela instalação de evaporadores de cloro e lavadores de gases.** 51 f. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em:<<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/36913/000793019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

FREITAS, Júnior. Estudante sofre intoxicação após vazamento de cloro gasoso em estação de tratamento de água de RO. **GloboG1**, 10 jun. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ro/guajara-mirim-regiao/noticia/estudante-sofre-intoxicacao-apos-vazamento-de-cloro-gasoso-em-estacao-de-ro.ghtml>>. Acesso em: 12 jun. 2021

GARCIA, Regilaine Cunha Duarte. **Avaliação da substituição do cloro gás pela produção eletrolítica de hipoclorito de sódio *in loco* em estação de tratamento de água de grande porte.** 2018, 86p. Dissertação - Mestrado em Qualidade Ambiental - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21336?mode=full>>. Acesso em: 28 abr. 2021

GOOGLE. **Programa do Google Maps - 2021.** Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/preview>>. Acesso em: 10 mar. 2021

GUPTA, Ramesh C.; VARMA, Daya R. Methyl isocyanate: the Bhopal gas. In: GUPTA, Ramesh C. (editor). **Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents.** 3. ed. Academic Press, 2020. p. 389-402. Disponível em: <

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012819090600026X>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

HANNA, Steven R.; BRIGGS, Gary A.; HOSKER, Rayford. **Handbook on atmospheric diffusion**. United States: Department of Energy, 1982. 100 p. Disponível em: < <https://doi.org/10.2172/5591108>>. Acesso em: 07 mai. 2021.

HIDROMAR. **Apostila manuseio de cilindros de cloro - 2015**. Disponível em:<<http://www.grupohidromar.com.br/wpcontent/themes/hidromar/download/Apostila-Manuseio-de-cilindros-de-cloro.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

IBGE. **População estimada de Cachoeirinha/RS - 2020**. Disponível em:<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/cachoeirinha/panorama>>. Acesso em: 25 mar. 2021.

INMET. **Dados meteorológicos - 2020**. Disponível em: < <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>>. Acesso em: 25 mar. 2021.

JONES, R.; LEHR, W.; SIMECEK-BEATTY, D.; REYNOLDS, M. **ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4: Technical Documentation**. U. S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43. Seattle: Emergency Response Division (NOAA), 2013. 96 p. Disponível em: < [https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ALOHA\\_Tech\\_Doc.pdf](https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ALOHA_Tech_Doc.pdf)>. Acesso em: 30 mar. 2021.

LOPES, T. J.; SCOTT, P.; SANTOS, N. L.; JUNIOR, A. H. S.; CORREIO, A. S.. Análise estatística de consequência de cenários hipotéticos de acidentes com vazamentos de gás cloro obtidos por simulação utilizando o software ALOHA. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, vol. 18, n. 2, p. 296-308, jul/dez. 2016. Disponível em: < <https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/4137> >. Acesso em: 10 mar. 2021.

MATOS, Juliana Schmitz Guarilha Costa. **Aplicação de Hazop Dinâmico na Avaliação de Perigo Operacional em uma Coluna de Destilação de uma Planta de Separação de Ar**. 2009. 83 f.. Dissertação - Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/aplicacao-do-hazop-dinamico.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

MORRIESEN, Cláudia. Vazamento de gás é registrado na ETA Cubatão, em Joinville. **NSC Total**, 11 nov. 2020. Disponível em: < <https://www.nscotal.com.br/noticias/vazamento-de-gas-e-registrado-na-eta-cubatao-em-joinville>>. Acesso em: 12 jun. 2021.

NRC (National Research Council). **Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals**. Washington DC: National Academy Press, 2004. v.4. Disponível em: < <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/tsd56.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2021.

NÉRIS, José Leandro Melgar; DAMBROZ, Pedro Nardi; WAYERBACHER, Walter

Teles; SALDANHA, Claudinéia Brazil; SALVI, Luciane Teresa. Avaliação da estabilidade atmosférica como instrumento para a gestão da qualidade do ar. In: **Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**, 10. ,2016, Porto Alegre. Disponível em: < [http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/\\_arqTrabalhos/trab\\_20160829114340000000655.pdf](http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_20160829114340000000655.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2021.

NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). **Chlorine - Immediately dangerous to life or health concentrations (IDLH) 2021**. Disponível em: < <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/pdfs/1994-IDLH-ValuesBackgroundDocs.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2021.

OPERÁRIO morto em fábrica de Nova Santa Rita inalou gás cloro em vazamento. **GaúchaGZH**, 05 jan. 2011. Disponível em: < <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2011/01/operario-morto-em-fabrica-de-nova-santa-rita-inalou-gas-cloro-em-vazamento-3165585.html>>. Acesso em: 13 jun. 2021.

PALAZZI, E.; DE FAVERI, Dante; FUMAROLA, Giuseppe; FERRAILOLO, G. Diffusion from a Steady Source of Short Duration. **Journal Atmospheric Environment**, vol. 16, p 2785- 2790, feb. 1982. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/328744668\\_DIFFUSION\\_FROM\\_A\\_STEADY\\_SOURCE\\_OF\\_SHORT\\_DURATION](https://www.researchgate.net/publication/328744668_DIFFUSION_FROM_A_STEADY_SOURCE_OF_SHORT_DURATION)>. Acesso em: 30 mar. 2021.

PASQUILL, F. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. **Meteorological Magazine**, v.90, p. 33-49, 1961.

PAUL, Rajesh; MONDAL, Animesh; CHOUDHURY, Shoukat; M.S. Dispersion modeling of accidental release of chlorine gas. In: **International Conference on Chemical Engineering**, 2014, Dhaka. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/319114497\\_Dispersion\\_Modeling\\_of\\_Accidental\\_Release\\_of\\_Chlorine\\_Gas](https://www.researchgate.net/publication/319114497_Dispersion_Modeling_of_Accidental_Release_of_Chlorine_Gas)>. Acesso em: 12 abr. 2021.

PEREIRA, Felipe dos Santos; SILVA, Martim Francisco de Oliveira e. **Panorama setorial 2015-2018: indústria química**. In: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (Brasil). Perspectivas do investimento 2015-2018 e panoramas setoriais. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2014. p. [109]-119. Disponível em: < <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/14377>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

PROSINOS. **Município de Cachoeirinha: Situação dos serviços de abastecimento de água potável e de esgotamento sanitário - 2014**. Disponível em: <<https://cachoeirinha.atende.net/atende.php?rot=1&aca=119&ajax=t&processo=viewFile&ajaxPrevent=1617565642724&file=s8jk5ebqj624mqlkifqpuc0gs3jsb87ffcvpjbea&sistema=WPO&classe=UploadMidia>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

SETARESHENAS, N.; MOHAMMAD KHALILIPOUR, M.; SHAHRAKI, F.; MANSOURI, M. Consequence Modeling of Chlorine Release from Water Treatment Plant. **Chemical Science International Journal**, v. 4, n. 1, p. 97-104, out. 2013. Disponível em: < <https://www.journalcsij.com/index.php/CSIJ/article/view/6847>>.

Acesso em: 10 mar. 2021.

SPICER, Tom; HAVENS, Jery. **User's guide for the degadis 2.1 - Dense Gas Dispersion Model.** 1989, 419p. Disponível em: <  
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000J5GU.PDF?Dockey=2000J5GU.PDF>>.

Acesso em: 30 mar. 2021.

# ANEXO A – Cenário 1

## Text Summary

ALOHA® 5.4.7



```
SITE DATA:
  Location: CACHOEIRINHA/RS, BRASIL
  Building Air Exchanges Per Hour: 0.10 (sheltered double storied)
  Time: May 8, 2021 1300 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:
  Chemical Name: CHLORINE
  CAS Number: 7782-50-5
  Molecular Weight: 70.91 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm  AEGL-2 (60 min): 2 ppm  AEGL-3 (60 min): 20
  ppm
  IDLH: 10 ppm
  Ambient Boiling Point: -34.0° C
  Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
  Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
  Wind: 1.55 meters/second from SSE at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest
  Cloud Cover: 3 tenths
  Air Temperature: 19.98° C
  Stability Class: A
  No Inversion Height
  Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: .743 meters
  Tank Length: 1.68 meters
  Tank Volume: .728 cubic meters
  Tank contains liquid
  Internal Temperature: -12° C
  Chemical Mass in Tank: 900 kilograms
  Tank is 82% full
  Circular Opening Diameter: 0.008 meters
  Opening is 0 meters from tank bottom
  Release Duration: 24 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 38.9 kilograms/min
  (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 900 kilograms
  Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase
  flow).

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red : 576 meters --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 1.9 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 3.7 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])

THREAT AT POINT:
  Concentration Estimates at the point:
  Downwind: 288 meters
  Off Centerline: 0 meters
  Max Concentration:
  Outdoor: 73.4 ppm
  Indoor: 2.79 ppm
```

## ANEXO B – Cenário 2

### Text Summary

#### SITE DATA:

Location: CACHOEIRINHA/RS, BRASIL  
Building Air Exchanges Per Hour: 0.10 (sheltered double storied)  
Time: May 8, 2021 1315 hours ST (user specified)

#### CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE  
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol  
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm  
IDLH: 10 ppm  
Ambient Boiling Point: -34.0° C  
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm  
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

#### ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 1.55 meters/second from SSE at 10 meters  
Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 3 tenths  
Air Temperature: 19.98° C Stability Class: A  
No Inversion Height Relative Humidity: 75%

#### SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank  
Non-flammable chemical is escaping from tank  
Tank Diameter: .743 meters Tank Length: 1.68 meters  
Tank Volume: .728 cubic meters  
Tank contains liquid Internal Temperature: -12° C  
Chemical Mass in Tank: 900 kilograms  
Tank is 82% full  
Circular Opening Diameter: 0.008 meters  
Opening is 0.74 meters from tank bottom  
Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour  
Max Average Sustained Release Rate: 1.69 kilograms/min  
(averaged over a minute or more)  
Total Amount Released: 61.9 kilograms  
Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

#### THREAT ZONE:

Model Run: Heavy Gas  
Red : 112 meters --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])  
Orange: 373 meters --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])  
Yellow: 771 meters --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])

#### THREAT AT POINT:

Concentration Estimates at the point:  
Downwind: 56 meters Off Centerline: 0 meters  
Max Concentration:  
Outdoor: 74.1 ppm  
Indoor: 4.31 ppm

## ANEXO C – Cenário 3

### Text Summary

ALOHA® 5.4.7



```
SITE DATA:
  Location: CACHOEIRINHA/RS, BRASIL
  Building Air Exchanges Per Hour: 0.10 (sheltered double storied)
  Time: May 8, 2021 1330 hours ST (user specified)

CHEMICAL DATA:
  Chemical Name: CHLORINE
  CAS Number: 7782-50-5
  Molecular Weight: 70.91 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm  AEGL-2 (60 min): 2 ppm  AEGL-3 (60 min): 20
  ppm
  IDLH: 10 ppm
  Ambient Boiling Point: -34.0° C
  Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
  Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
  Wind: 1.55 meters/second from SSE at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest
  Cloud Cover: 3 tenths
  Air Temperature: 19.98° C
  Stability Class: B
  No Inversion Height
  Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: .743 meters
  Tank Length: 1.68 meters
  Tank Volume: .728 cubic meters
  Tank contains liquid
  Internal Temperature: -12° C
  Chemical Mass in Tank: 900 kilograms
  Tank is 82% full
  Circular Opening Diameter: 0.008 meters
  Opening is 0 meters from tank bottom
  Release Duration: 24 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 38.9 kilograms/min
  (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 900 kilograms
  Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase
  flow).

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red : 690 meters --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 2.3 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 4.4 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])

THREAT AT POINT:
  Concentration Estimates at the point:
  Downwind: 345 meters
  Off Centerline: 0 meters
  Max Concentration:
  Outdoor: 65.8 ppm
  Indoor: 2.55 ppm
```



## ANEXO D – Cenário 4

### Text Summary

ALOHA® 5.4.7



#### SITE DATA:

Location: CACHOEIRINHA/RS, BRASIL  
Building Air Exchanges Per Hour: 0.10 (sheltered double storied)  
Time: May 8, 2021 1330 hours ST (user specified)

#### CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE  
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol  
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm  
IDLH: 10 ppm  
Ambient Boiling Point: -34.0° C  
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm  
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

#### ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 1.55 meters/second from SSE at 10 meters  
Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 3 tenths  
Air Temperature: 19.98° C Stability Class: B  
No Inversion Height Relative Humidity: 75%

#### SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank  
Non-flammable chemical is escaping from tank  
Tank Diameter: .743 meters Tank Length: 1.68 meters  
Tank Volume: .728 cubic meters  
Tank contains liquid Internal Temperature: -12° C  
Chemical Mass in Tank: 900 kilograms  
Tank is 82% full  
Circular Opening Diameter: 0.008 meters  
Opening is 0.74 meters from tank bottom  
Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour  
Max Average Sustained Release Rate: 1.69 kilograms/min  
(averaged over a minute or more)  
Total Amount Released: 61.9 kilograms  
Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

#### THREAT ZONE:

Model Run: Heavy Gas  
Red : 139 meters --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])  
Orange: 467 meters --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])  
Yellow: 965 meters --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])

#### THREAT AT POINT:

Concentration Estimates at the point:  
Downwind: 69.5 meters Off Centerline: 0 meters  
Max Concentration:  
Outdoor: 72.2 ppm  
Indoor: 4.15 ppm

## ANEXO E – Cenário 5

### Text Summary

ALOHA® 5.4.7



**SITE DATA:**  
Location: CACHOEIRINHA/RS, BRASIL  
Building Air Exchanges Per Hour: 0.08 (sheltered double storied)  
Time: May 8, 2021 1345 hours ST (user specified)

**CHEMICAL DATA:**  
Chemical Name: CHLORINE  
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol  
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm  
IDLH: 10 ppm  
Ambient Boiling Point: -34.0° C  
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm  
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

**ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)**  
Wind: 1.55 meters/second from SSE at 10 meters  
Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 3 tenths  
Air Temperature: 19.98° C  
Stability Class: F (user override)  
No Inversion Height Relative Humidity: 75%

**SOURCE STRENGTH:**  
Leak from hole in horizontal cylindrical tank  
Non-flammable chemical is escaping from tank  
Tank Diameter: .743 meters Tank Length: 1.68 meters  
Tank Volume: .728 cubic meters  
Tank contains liquid Internal Temperature: -12° C  
Chemical Mass in Tank: 900 kilograms  
Tank is 82% full  
Circular Opening Diameter: 0.008 meters  
Opening is 0 meters from tank bottom  
Note: RAILCAR predicts a stationary cloud or 'mist pool' will form.  
Model Run: traditional ALOHA tank  
Release Duration: 24 minutes  
Max Average Sustained Release Rate: 38.9 kilograms/min  
(averaged over a minute or more)  
Total Amount Released: 900 kilograms  
Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

**THREAT ZONE:**  
Model Run: Heavy Gas  
Red : 1.2 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])  
Orange: 4.2 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])  
Yellow: 8.2 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])

**THREAT AT POINT:**  
Concentration Estimates at the point:  
Downwind: 600 meters Off Centerline: 0 meters  
Max Concentration:  
Outdoor: 59.1 ppm  
Indoor: 1.94 ppm

## ANEXO F – Cenário 6

### Text Summary

ALOHA® 5.4.7



#### SITE DATA:

Location: CACHOEIRINHA/RS, BRASIL  
Building Air Exchanges Per Hour: 0.08 (sheltered double storied)  
Time: May 8, 2021 1345 hours ST (user specified)

#### CHEMICAL DATA:

Chemical Name: CHLORINE  
CAS Number: 7782-50-5 Molecular Weight: 70.91 g/mol  
AEGL-1 (60 min): 0.5 ppm AEGL-2 (60 min): 2 ppm AEGL-3 (60 min): 20 ppm  
IDLH: 10 ppm  
Ambient Boiling Point: -34.0° C  
Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm  
Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%

#### ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)

Wind: 1.55 meters/second from SSE at 10 meters  
Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 3 tenths  
Air Temperature: 19.98° C  
Stability Class: F (user override)  
No Inversion Height Relative Humidity: 75%

#### SOURCE STRENGTH:

Leak from hole in horizontal cylindrical tank  
Non-flammable chemical is escaping from tank  
Tank Diameter: .743 meters Tank Length: 1.68 meters  
Tank Volume: .728 cubic meters  
Tank contains liquid Internal Temperature: -12° C  
Chemical Mass in Tank: 900 kilograms  
Tank is 82% full  
Circular Opening Diameter: 0.008 meters  
Opening is 0.74 meters from tank bottom  
Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour  
Max Average Sustained Release Rate: 1.69 kilograms/min  
(averaged over a minute or more)  
Total Amount Released: 61.9 kilograms  
Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

#### THREAT ZONE:

Model Run: Heavy Gas  
Red : 291 meters --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])  
Orange: 1.3 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])  
Yellow: 2.6 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])

#### THREAT AT POINT:

Concentration Estimates at the point:  
Downwind: 145.5 meters Off Centerline: 0 meters  
Max Concentration:  
Outdoor: 57.1 ppm  
Indoor: 3.07 ppm

## **AGRADECIMENTOS**

À DEUS que sustenta todas as coisas, em forma de vida ou não.

À professora Ma. Marlene Guevara dos Santos, pela orientação, manifestada através das correções, revisões e sugestões.