**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**

**Centro de Engenharias**

**Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais**

Dissertação

# Modelagem da dispersão atmosférica de gases densos decorrente de liberações acidentais no transporte rodoviário com produtos perigosos

**Carolina Pinz Medronha**

Pelotas, 2023.

**Carolina Pinz Medronha**

# Modelagem da dispersão atmosférica de gases densos decorrente de liberações acidentais no transporte rodoviário com produtos perigosos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Daniela Buske.

Coorientador: Guilherme Jahnecke Weymar.

Pelotas, 2023.

Carolina Pinz Medronha

Modelagem da dispersão atmosférica de gases densos decorrente de liberações acidentais no transporte rodoviário com Produtos Perigosos

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 26 de junho de 2023.

Banca examinadora:

Profª. Dr.ª Daniela Buske (Orientador)
Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Guilherme Jahnecke Weymar (Coorientador)
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Glênio Aguiar Gonçalves
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Cícero Coelho de Escobar
Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Igor da Cunha Furtado
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros (suplente)
Doutor em matemática aplicada pela Technische Universität Darmstadt na Alemanha.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

M488m Medronha, Carolina Pinz

Modelagem da dispersão atmosférica de gases densos decorrente de liberações acidentais no transporte rodoviário com produtos perigosos / Carolina Pinz Medronha ; Daniela Buske, orientadora ; Guilherme Jahnecke Weymar, coorientador. — Pelotas, 2023.

124 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Produtos perigosos. 2. Dispersão atmosférica. 3. Software ALOHA. 4. Amônia (NH3). 5. Cloro (CL2). I. Buske, Daniela, orient. II. Weymar, Guilherme Jahnecke, coorient. III. Título.

CDD : 363.7

Elaborada por Maria Inez Figueiredo Figas Machado CRB: 10/1612

**MODELAGEM DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE GASES DENSOS DECORRENTE DE LIBERAÇÕES ACIDENTAIS NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO COM PRODUTOS PERIGOSOS**

por

**Carolina Pinz Medronha**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, PPGCAmb, do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

**Mestre em Ciências Ambientais**

Banca Examinadora:

Profª. Dr.ª Daniela Buske - Orientadora (PPGCAmb/ PPGMMat - UFPel)

Prof. Dr. Guilherme Jahnnecke Weymar – coorientador (PPGMMat - UFPel)

Prof. Dr. Glênio Aguiar Gonçalves (PPGMMat - UFPel)

Prof. Dr. Cícero Coelho de Escobar (PPGCAmb - UFPel)

Prof. Dr. Igor da Cunha Furtado (IFSul)

Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros (PPGMMat - UFPel)

Pelotas, 26 de junho de 2023.

**Agradecimentos**

Primeiramente, a Deus por me permitir alcançar este objetivo.

À minha orientadora Profª. Dr.ª Daniela Buske e meu coorientador Prof. Dr. Guilherme Jahnecke Weymar, profissionais de extrema competência, pela paciência e pelos preciosos momentos de aprendizagem em nossas reuniões de orientação e avaliação deste trabalho. O incentivo de vocês foi essencial para atingir este objetivo.

Aos professores que participaram das bancas examinadoras no exame de qualificação e na defesa da dissertação, Prof. Dr. Cícero Coelho de Escobar, Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros, Prof. Dr. Glênio Aguiar Gonçalves e Prof. Dr. Igor da Cunha Furtado, pelas relevantes contribuições.

Ao Prof. Ms. Marco Aurélio Rocha por me apresentar o *software* utilizado no trabalho.

A todos colegas e professores do mestrado, em especial à minha amiga Ana Rozado Gomes, pelo apoio e amizade sincera.

Agradeço à minha família, especialmente à minha dinda Síntia Fischer, pela ajuda no pré-projeto e escolha da orientação, tua ajuda e apoio foram fundamentais.

Aos meus pais, a minha mãe Loiva Medronha e meu pai Rodnei Medronha, pelo amor, apoio e orações, esforços que produziram frutos.

E finalmente, a todos que direta ou indiretamente colaboraram nessa jornada de mestrado.

**Resumo**

MEDRONHA, Carolina Pinz. **Modelagem da dispersão atmosférica de gases densos decorrente de liberações acidentais no transporte rodoviário com produtos perigosos.** 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

Este trabalho teve como objetivo analisar a dispersão atmosférica de gases densos, como a amônia ($NH_3$) e o cloro ($Cl_2$), decorrentes de vazamentos hipotéticos na cisterna de um caminhão durante o transporte rodoviário. Com a utilização de modelos matemáticos, foi possível estimar, considerando uma liberação acidental, a distância até a qual a nuvem formada na atmosfera se deslocará a partir do ponto de vazamento, até que esteja suficientemente diluída para não representar perigo em termos de toxicidade. Para realizar essa análise, utilizou-se o *software* ALOHA e o *Google Earth*. Entre os cenários analisados, os resultados demostraram que no Cenário 1 (Cenário 1: Manual ALOHA – Cloro) a nuvem tóxica teve um alcance de 1,37 km de comprimento na zona vermelha, ou seja, na zona letal e o objetivo foi validar o método utilizado nos demais cenários. No Cenário 2 (Cenário 2: Acidente BR-392 – Cloro), a nuvem que teve o maior alcance entre as liberações contínuas foi no caso 2, com a altura do orifício de vazamento em 0 m, com 5 km de comprimento na zona vermelha e entre as liberações instantâneas foi no caso 3, com a altura do orifício de vazamento em 0 m, com 4,7 km de comprimento na zona vermelha. Por fim, no Cenário 3 (Cenário 3: ETA Santa Bárbara – Amônia), a pluma que teve o maior alcance no período noturno foi no caso 6, com distância de 484 m, na zona vermelha, no período diurno o maior alcance foi no caso 4, com 139 m de comprimento na zona vermelha.

**Palavras-chave:** Produtos Perigosos, Dispersão Atmosférica, *Software* ALOHA, Amônia ($NH_3$), Cloro ($Cl_2$).

**Abstract**

MEDRONHA, Carolina Pinz. **Modeling atmospheric dispersion of dense gases resulting from accidental releases in road transport of hazardous materials.** 2023. 124 p. Dissertation (Master's in Science) - Environmental Sciences Graduate Program, Center for Engineering, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

This work aimed to analyze the atmospheric dispersion of dense gases, such as ammonia ($NH_3$) and chlorine ($Cl_2$), resulting from hypothetical leaks in the tank of a truck during road transportation. By using mathematical models, it was possible to estimate, considering an accidental release, the distance to which the cloud formed in the atmosphere would travel from the leakage point until it is sufficiently diluted to no longer pose a danger in terms of toxicity. To perform this analysis, the ALOHA software and Google Earth were used. Among the scenarios analyzed, the results showed that in Scenario 1 (Scenario 1: Manual ALOHA – Chlorine), the toxic cloud reached a length of 1,37 km in the red zone, which is the lethal zone, and the objective was to validate the method used in the other scenarios. In Scenario 2 (Scenario 2: BR-392 Accident – Chlorine), the cloud with the greatest reach among continuous releases was in case 2, with the leak hole height at 0 m, having a length of 5 km in the red zone, and among instant releases, it was in case 3, with the leak hole height at 0 m, with a length of 4,7 km in the red zone. Finally, in Scenario 3 (Scenario 3: Santa Bárbara WTP – Ammonia), the plume that had the greatest reach during the nighttime was in case 6, with a distance of 484 m in the red zone, and during the daytime, the greatest reach was in case 4, with a length of 139 m in the red zone.

**Keywords:** Hazardous Materials, Atmospheric Dispersion, ALOHA Software, Ammonia ($NH_3$), Chlorine ($Cl_2$).

## Lista de Figuras

Figura 1 - Densidade do gás amônia em função da temperatura a 1 atm. .....20
Figura 2 - Densidade do gás amônia em função da temperatura e pressão. .....21
Figura 3 - Curva de pressão de vapor de amônia. .....21
Figura 4 - Solubilidade da amônia em água. .....22
Figura 5 - Densidade do gás cloro. .....28
Figura 6 - Curva de pressão de vapor para cloro líquido. .....29
Figura 7 - Viscosidade do cloro. .....30
Figura 8 - Modelo de dispersão de gases na atmosfera. .....34
Figura 9 - Dispersão em atmosfera instável. .....35
Figura 10 - Dispersão em atmosfera estável. .....36
Figura 11 - Distribuição gaussiana e propagação gaussiana. .....37
Figura 12 - Etapas da dispersão de uma nuvem densa. .....39
Figura 13 - Jato bifásico de amônia. .....40
Figura 14 - Fases de vazamento de amônia anidra na fase gasosa. .....42
Figura 15 - Vazamento de amônia (direita) e cloro (esquerda) – Fase 1. .....42
Figura 16 - Vazamento de amônia (direita) e cloro (esquerda) – Fase 2. .....43
Figura 17 - Vazamento de amônia (direita) e cloro (esquerda) – Fase 3. .....43
Figura 18 - Vazamento de amônia (direita) e cloro (esquerda) – Fase 4. .....44
Figura 19 - Perfil típico de um vazamento de gás .....45
Figura 20 - Vazamento descontínuo de gás cloro. .....46
Figura 21 - Vazamento de gás cloro. .....46
Figura 22 - Comportamento da pluma de dispersão de uma emissão atmosférica em função da distribuição gaussiana. .....54
Figura 23 - Modelo de pluma proposto por Colenbrander. .....56
Figura 24 - Seleção dos LOCs e Zona de ameaça. .....57
Figura 25 - Valores de IPVS – IDLH (ppm). .....61
Figura 26 - Painel de Segurança e Rótulo de risco. .....64
Figura 27 - Painel de Segurança. .....65
Figura 28 - Ilustração do Rótulo de Risco. .....66
Figura 29 - Simbologia Riscos ao Meio Ambiente. .....66
Figura 30 - Carga a Granel – Um produto. .....67
Figura 31 - Classificação de Zonas de Segurança. .....69

Figura 32 - Zona de Segurança de Área - PSA. .....70
Figura 33 - Comparativo do número de acidentes registrados pelo IBAMA por classe de risco no ano de 2010, e o consolidado (total) de acidentes ocorridos nos anos de 2006 a 2010. .....72
Figura 34 - Percentual de acidentes por local, referente aos anos de 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010. .....73
Figura 35 - Tipos de Emergências no Rio Grande do Sul, 2004-2019. .....74
Figura 36 – Resultados simulados - Cenário 1: Manual ALOHA. .....83
Figura 37 - C1 caso 1: 0 m - Resultados simulados - Cenário 2. .....84
Figura 38 - C1 caso 2: 2 m - Resultados simulados - Cenário 2. .....85
Figura 39 - C2 caso 1: 0 m - Resultados simulados - Cenário 2. .....85
Figura 40 - C2 caso 2: 2 m - Resultados simulados - Cenário 2. .....86
Figura 41 - C3 caso 1: 0 m - Resultados simulados - Cenário 2. .....87
Figura 42 - C3 caso 2: 2 m - Resultados simulados - Cenário 2. .....87
Figura 43 - C4 caso 1: 0 m - Resultados simulados - Cenário 2. .....88
Figura 44 - C4 caso 2: 2 m - Resultados simulados - Cenário 2. .....89
Figura 45 - Caso 1: estabilidade A. Resultados simulados - Cenário 3. .....91
Figura 46 - Caso 2: estabilidade B. Resultados simulados - Cenário 3. .....91
Figura 47 - Caso 3: estabilidade C. Resultados simulados – Cenário 3. .....92
Figura 48 - Caso 4: estabilidade D. Resultados simulados - Cenário 3. .....92
Figura 49 - Caso 5: estabilidade C. Resultados simulados - Cenário 3. .....93
Figura 50 - Caso 6: estabilidade F. Resultados simulados - Cenário 3. .....93
Figura 51 - Caso 7: estabilidade E. Resultados simulados - Cenário 3. .....94
Figura 52 - Caso 8: estabilidade D. Resultados simulados - Cenário 3. .....94
Figura 53 - Caso 9: estabilidade D. Resultados simulados - Cenário 3. .....95

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas da amônia. .....19
Tabela 2 - Propriedades físicas e químicas do cloro. .....26
Tabela 3 - Manifestações clínicas do gás cloro. .....31
Tabela 4 - Classes de estabilidade de Pasquill. .....35
Tabela 5 - Insolação solar em função da radiação solar incidente. .....35
Tabela 6 - Coeficiente de dispersão para plumas. .....38
Tabela 7 - Número de acidentes ambientais por local, no ano de 2010 e consolidado de 2006 a 2010. .....74
Tabela 8 - Casos analisados - Cenário 2: Acidente BR-392. .....80
Tabela 9 - Casos analisados - Cenário 3: ETA Santa Bárbara. .....81
Tabela 10 - Alcance da nuvem tóxica - Cenário 1: Manual ALOHA. .....83
Tabela 11 - Alcance da nuvem tóxica - Cenário 2: Acidente BR-392. .....90
Tabela 12 - Alcance da nuvem tóxica - Cenário 3: ETA Santa Bárbara. .....97

## Lista de Quadros

Quadro 1 - Principais resultados de estudos experimentais em humanos. .....24
Quadro 2 - Efeitos da amônia em humanos de acordo com a concentração. .....25
Quadro 3 - Valores toxicológicos do cloro. .....32
Quadro 4 - Resumo dos principais testes de dispersão relativos a gases pesados. .52
Quadro 5 - Valores toxicológicos: Amônia.....59
Quadro 6 - Valores toxicológicos: Cloro. .....60
Quadro 7 - Denominação de classes e subclasses de risco de produtos perigosos. 63
Quadro 8 - Quadro de definição de atribuições legais.....68
Quadro 9 - Distâncias de isolamento inicial e de ação protetora.....71

## Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|---|---|
| ABIQUIM | Associação Brasileira da Indústria Química |
| AEGL | *Acute Exposure Guidelines Levels* |
| ALOHA | *Area Location of Hazardous atmospheres* |
| ANTT | Agência Nacional de Transportes Terrestres |
| BLEVE | *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* |
| CAS | *Chemical Abstracts Service* |
| CBM/GO | Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás |
| CBM/RS | Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio Grande do Sul |
| CLA | Camada Limite Atmosférica |
| DEGADIS | *Dense Gas Dispersion* |
| DER | Departamento de Estradas de Rodagens |
| EPA | *Environmental Protection Agency* |
| EPI | Equipamentos de Proteção Individual |
| ERD | *Emergency Response Division* |
| ERPG | *Emergency Response Planning Guidelines* |
| ETA | Estação de Tratamento de Água |
| FEPAM | Fundação Estadual de Proteção Ambiental |
| FISPQ | Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos |
| HAZMAT | *Hazardous Materials Response Division* |
| HEGADIS | *Heavy Gas Dispersion* |
| IBAMA | Instituto Brasileiro de Meio Ambiente Recursos Naturais Renováveis |
| IDLH | *Immediately Dangerous to Life or Health Air Concentration* |
| INERIS | Instituto Nacional de Meio Ambiente e Riscos Industriais |
| IPVS | Imediatamente Perigoso à Vida e Saúde |
| $LD_{50}$ | *Lethal dose* |
| LOCs | *Level of Concern* |
| NFPA | *National Fire Protection Association* |
| NIOSH | *National Institute for Occupational Safety and Health* |
| NOAA | *National Oceanic and Atmospheric Administration* |
| ONU | Organização das Nações Unidas |

| | |
|---|---|
| PAC | *Protective Action Criteria* |
| PH | Potencial Hidrogeniônico |
| PP | Produto Perigoso |
| PRF | Policia Rodoviária Federal |
| PVC | Policloreto de vinila |
| PPM | Partes por milhão |
| RG | Registro Geral |
| SNIE | *Special National Intelligence Estimate* |
| TEELs | *Temporary Emergency Exposure Limits* |

**Sumário**


**1. INTRODUÇÃO ..... 16**

**1.1 Objetivos ..... 18**

1.1.1 Geral ..... 18

1.1.2 Específicos ..... 18

**2. GASES DENSOS ..... 19**

**2.1 Amônia ($NH_3$) ..... 19**

2.1.1 Toxicidade da amônia ..... 23

**2.2 Cloro ($Cl_2$) ..... 26**

2.2.1 Toxicidade do cloro ..... 30

**3. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA ..... 33**

**3.1 Dispersão atmosférica ..... 33**

**3.2 Estabilidade atmosférica ..... 34**

**3.3 Dispersão de gases neutros ..... 36**

**3.4 Dispersão de gases densos ..... 38**

**3.5 Características das liberações bifásicas ..... 39**

**3.6 Características das liberações na fase gasosa ..... 41**

**3.7 Dispersão atmosférica – Cloro ($Cl_2$) ..... 44**

**3.8 Principais ensaios de dispersão atmosférica ..... 47**

**4. SOFTWARE ALOHA ..... 53**

**4.1 Modelo de pluma gaussiana ..... 54**

**4.2 ALOHA - DEGADIS ..... 55**

**4.3 Níveis tóxicos ..... 57**

**5. IDENTIFICAÇÃO DE PRODUTOS PERIGOSOS NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO ..... 62**

**5.1 Sequência operacional de acidentes ..... 67**

**5.2 Zonas de segurança ..... 68**

**6. ANÁLISE DE ACIDENTES ENVOLVENDO PRODUTOS PERIGOSOS ..... 72**

**6.1 Classe de risco e locais de ocorrência de acidentes ..... 72**

**6.2 Análise histórica de acidentes ..... 75**

**7. METODOLOGIA ..... 78**

**7.1 Cenário 1: Manual ALOHA - Cloro ($Cl_2$) ..... 78**

**7.2 Cenário 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$) ..... 79**

**7.3 Cenário 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) ..... 80**
**8. RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 83**
**8.1 Cenário 1: Manual ALOHA - Cloro ($Cl_2$) ..... 83**
**8.2 Cenário 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$) ..... 84**
**8.3 Cenário 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) ..... 90**
**CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS ..... 98**
**REFERÊNCIAS ..... 100**
**ANEXOS ..... 105**

# 1. INTRODUÇÃO

No transporte terrestre, produtos perigosos são considerados aqueles materiais que podem causar dano ou apresentar risco à saúde, segurança e meio ambiente. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), que adotou critérios técnicos para a classificação, conforme suas propriedades físico-químicas e toxicológicas que são enquadradas em 9 (nove) classes de risco e suas respectivas subclasses (ANTT, 2018).

De acordo com a classificação da ONU para produtos perigosos, tanto a amônia ($NH_3$) quanto o cloro ($Cl_2$) pertencem à subclasse de risco 2.3, sendo considerados gases tóxicos quando inalados. Para fins de identificação, a amônia possui o número ONU 1005 e número de risco 268, que indica que é um gás tóxico e corrosivo. Da mesma forma, o cloro é identificado pelo número ONU 1017 e pelo número de risco 268 (ABIQUIM, 1999).

O estudo da dispersão atmosférica de gases densos é de grande importância por duas razões principais. Em primeiro lugar, a amônia é uma substância amplamente utilizada em diversos setores industriais e em sistemas de resfriamento de câmaras frigoríficas e ar condicionado industrial, devido às suas propriedades químicas e físicas.

Da mesma forma, o cloro também é um elemento químico com grande importância para a sociedade, tendo uma variedade de utilizações em processos industriais. É encontrado em diversos produtos de uso comum, como água sanitária, canos de PVC e silicones. Além disso, é utilizado em processos industriais para obtenção de produtos que não possuem cloro em sua composição final, como é o caso da gasolina, tratamento de água potável e controle de pragas (POMARES *et al*., 2019).

Em segundo lugar, tanto a amônia quanto o cloro apresentam riscos significativos à saúde e ao meio ambiente devido à sua reatividade e propriedades físico-químicas. Ambos são gases irritantes e corrosivos e que em determinadas concentrações podem causar danos irreversíveis e até levar à morte. Por isso, são transportados com medidas rigorosas de segurança para minimizar o risco de acidentes (POMARES *et al*., 2019).

Os estudos de dispersão atmosférica consistem em avaliações dos impactos ambientais causados por fontes emissoras de gases através da modelagem matemática.

Assim, pretende-se realizar um estudo de dispersão atmosférica em acidentes envolvendo gases tóxicos. Os processos de dispersão da nuvem de produtos tóxicos ocorrem por meio da difusão e da advecção (transporte pelo vento), que segundo Casal (2008), a nuvem se move na direção do vento, enquanto, perpendicularmente a esta direção a dispersão ocorre em função da turbulência atmosférica.

Neste estudo, optou-se por utilizar uma ferramenta computacional para o estudo da dispersão atmosférica de gases tóxicos, o *software* ALOHA (*Area Location of Hazardous atmospheres*), desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). O ALOHA é muito utilizado na literatura para estimar a distância a que uma substância pode atingir em função do cenário acidental (CARDOSO *et al*., 2012).

As questões ligadas a esse tipo de transporte interessam não só aos fabricantes desses produtos, como às transportadoras e a todas as organizações públicas e privadas, que de alguma forma estão ligadas à segurança do trânsito nas rodovias e da comunidade que se encontra próxima ao acidente.

Devido a isso, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento da dispersão atmosférica do gás amônia ($NH_3$) e do gás cloro ($Cl_2$) durante vazamentos hipotéticos por meio de simulações com utilização de modelos matemáticos, para estimar as diferentes zonas de perigo associadas às concentrações tóxicas de interesse AEGL-1 (zona não prejudicial), AEGL-2 (zona prejudicial) e AEGL-3 (zona letal) e a plotagem dessas informações em mapas georreferenciados.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

Este estudo visa avaliar o comportamento da dispersão atmosférica de gases densos durante vazamentos hipotéticos no transporte rodoviário de produtos perigosos, por meio de simulações com utilização de modelo matemático, para estimar as diferentes zonas de perigo associadas às concentrações tóxicas de interesse AEGL-1 (zona não prejudicial), AEGL-2 (zona prejudicial) e AEGL-3 (zona letal) e a plotagem dessas informações em mapas georreferenciados.

### 1.1.2 Específicos

- Estudar cenários distintos e verificar os principais comportamentos do cloro e da amônia na dispersão atmosférica;
- Identificar produtos perigosos no transporte rodoviário, suas propriedades físico-químicas, bem como os riscos e perigos do gás amônia e do gás cloro;
- Estabelecer parâmetros para análise de modelos matemáticos de dispersão de poluentes atmosféricos;
- Identificar as concentrações AEGL 1, 2 e 3 para um período de 60 minutos e avaliar os efeitos toxicológicos;

# 2. GASES DENSOS

## 2.1 Amônia ($NH_3$)

De acordo com a Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ) o amoníaco, também conhecido como gás amoníaco ou amônia ($NH_3$), é a forma anidra (sem água) da amônia, é uma substância química alcalina sem cor, com um cheiro forte e irritante. Dependendo da temperatura e da pressão, pode ser encontrado como um gás incolor, um líquido incolor ou mesmo um sólido branco.

Conforme Pomares (2019), a amônia é amplamente utilizada em diversas indústrias e processos. Aproximadamente 80% da amônia consumida é empregada na produção de fertilizantes, como fonte de nitrogênio. Além disso, é empregada na indústria química em sínteses de compostos como ureia, hidrazina e ácido nítrico, bem como na indústria petroquímica para neutralização de óleo e na produção de catalisadores.

Na metalurgia é utilizada em ambientes de tratamento térmico, enquanto na agroindústria é usada para fertilização do solo e tratamento da palha. A indústria de papel emprega a amônia para eliminação do cálcio, enquanto na indústria da borracha é utilizada para evitar a coagulação do látex. Também é empregada na indústria têxtil como solvente e na eletrônica para tratamento de superfície, além de ser usada como líquido refrigerante em sistemas de refrigeração, como em frigoríficos e fábricas de gelo. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades físicas e químicas da amônia.

Tabela 1 - Propriedades físicas e químicas da amônia.

| Propriedade | Valor | Propriedade | Valor |
|---|---|---|---|
| Fórmula química | $NH_3$ | Pressão de vapor a 20°C | 858,7 kPa |
| Peso molecular | 17,03 g/mol | Ponto de flash | - 65 °C |
| Ebulição | - 33,4 °C | Densidade do gás a 20°C | 0,610 kg/m$^3$ |
| Ponto de fusão | - 77,7 °C | Densidade do líquido a 20°C | 607 g/m$^3$ |
| Gravidade específica | 0,5971 (ar) | Temperatura autoignição | 650 °C |

Fonte: adaptado de Bubbico; Mazzarotta e Verdone (2014).

É justamente por causa de tantas aplicações que faz com que derramamentos e vazamentos com amônia se tornem cada vez mais frequente, deixando mortos e feridos, além de alertar os profissionais de emergência.

A densidade dos vapores é menor que a do ar, por isso tenderá a se deslocar e se dissipar na atmosfera na medida em que sobe, mas fatores como umidade, temperatura e o local de vazamento são importantes, pois, condicionaram tanto propriedades físicas como temperatura de fusão, temperatura de ebulição, condutividade elétrica, solubilidade, etc.

Esses fatores fazem com que a nuvem atinja áreas baixas; da mesma forma, a densidade do líquido é menor que a da água, então tecnicamente flutuará sobre ela; no entanto, devido à sua alta solubilidade, fará com que se dissolva uniformemente (POMARES *et al*., 2019).

Na Figura 1 pode ser observada a densidade do gás em função da temperatura e na Figura 2, a densidade do gás em função da temperatura e pressão.

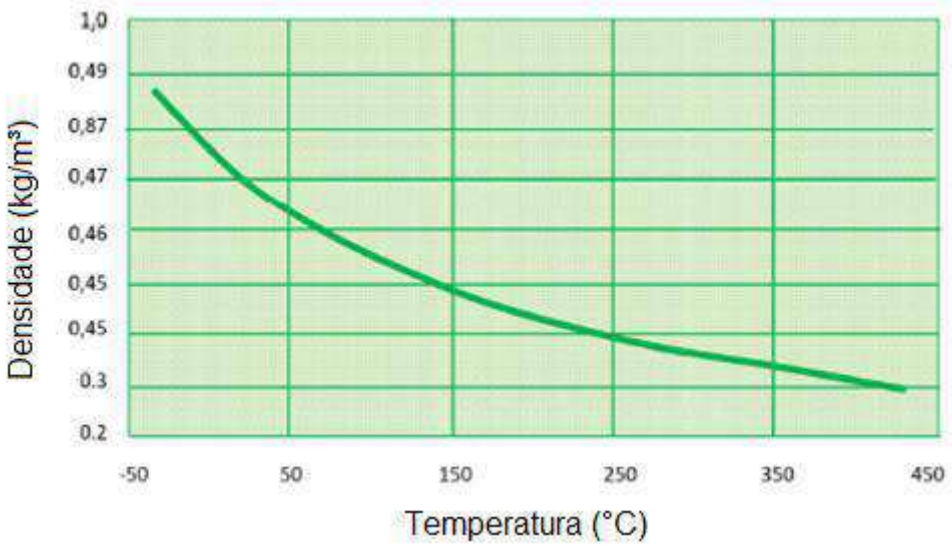


Figura 1 - Densidade do gás amônia em função da temperatura a 1 atm.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con amoniaco para bomberos V1 – 2019.*

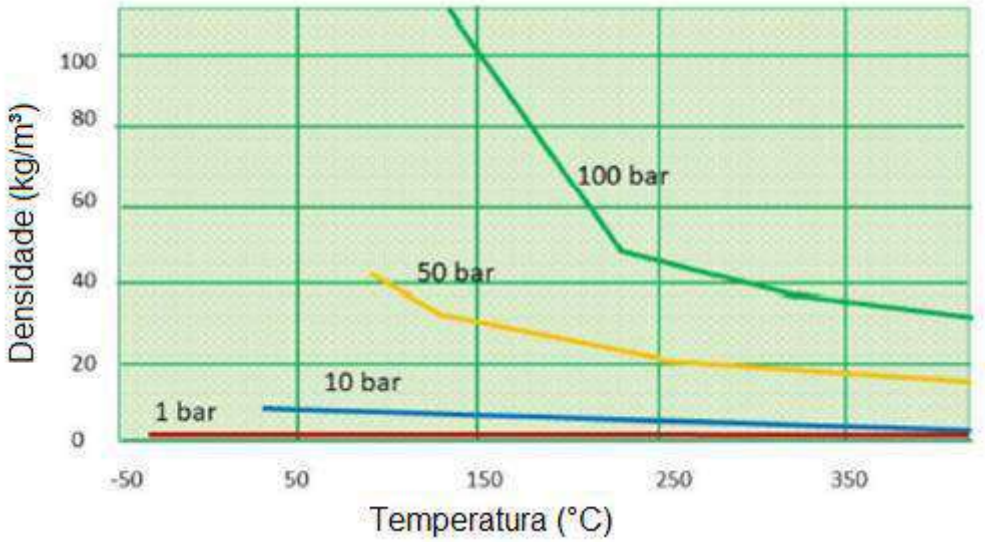


Figura 2 - Densidade do gás amônia em função da temperatura e pressão.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con amoniaco para bomberos V1 – 2019.*

Quando a amônia é armazenada em reservatório, tanque ou cisterna onde há mais de uma fase, a pressão de armazenamento dependerá da temperatura do líquido; assim, à temperatura ambiente (25°C), a amônia é armazenada na fase líquida a uma pressão de aproximadamente 8,5 bar (Figura 3).

Para armazenar a amônia líquida, a amônia anidra possui um alto coeficiente de expansão (1:850), portanto os tanques devem ter um limite máximo de enchimento de 85% (POMARES *et al*., 2019).

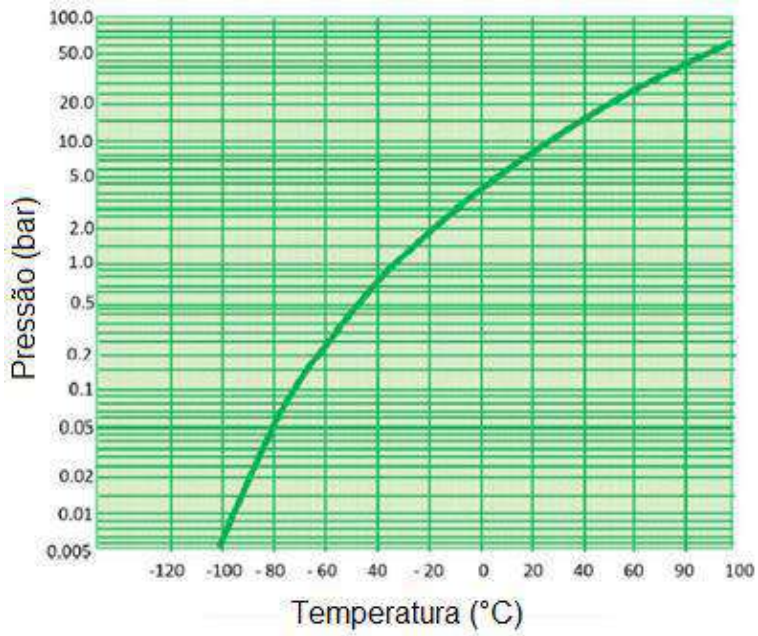


Figura 3 - Curva de pressão de vapor de amônia.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con amoniaco para bomberos V1 – 2019.*

A amônia na fase líquida tem um alto calor de evaporação (1,37KJ$^{-1}$ a -33,5°C) e tem um comportamento físico muito parecido ao da água devido à sua polaridade, mas tem uma reatividade menor que a água com relação a metais eletropositivos, uma vez que estes reagem imediatamente com a água para liberar hidrogênio, enquanto que com amônia anidra líquida se dissolvem para dar soluções azuladas também com liberação de hidrogênio.

Na ausência de umidade pode ser considerada uma substância relativamente não corrosiva, embora na presença de água ela se eleve formando uma base moderada com pH superior a 11. Sendo um gás à temperatura ambiente, possui grande fluidez, compressibilidade e tendência à expansão, sendo as forças de coesão entre suas moléculas praticamente nulas (POMARES *et al*., 2019).

A massa de um gás depende de três variáveis principais: pressão, volume e temperatura, que não são independentes uma da outra, sendo cada uma delas é sempre função das outras duas. Seu comportamento se aproxima de gases ideais ou perfeitos se a pressão for muito baixa e a temperatura for alta (condições muito distantes da liquefação).

A amônia é altamente solúvel em água e, em baixas temperaturas, forma hidratos cristalinos. Embora seja muito comum se referir a soluções aquosas como soluções de base fraca de $NH_4OH$, comumente chamadas de "hidróxido de amônio". Na Figura 4 a solubilidade na água é observada.

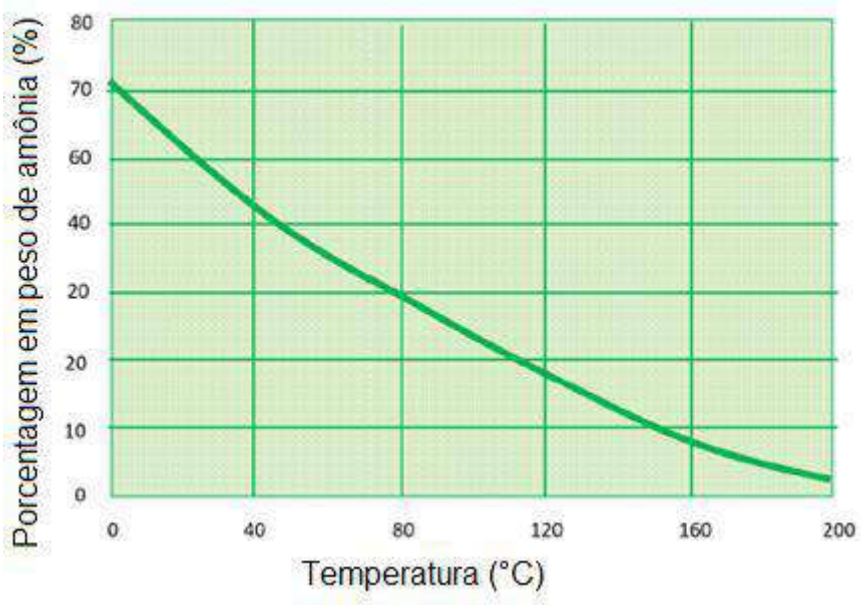


Figura 4 - Solubilidade da amônia em água.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con amoniaco para bomberos V1 – 2019.*

Apesar da amônia ser considerada um gás não inflamável pelas Nações Unidas, tudo vai depender das concentrações. Sua inflamabilidade é difícil porque as concentrações de que precisa são muito altas e sua difusão no ar é muito rápida, mas em ambientes fechados é perigoso. Sua faixa de inflamabilidade está entre 15-28%, faixa muito alta e muito estreita para produzir atmosferas inflamáveis, já que uma concentração de amônia de 16%, equivalente a 160.000 ppm, não é muito comum; mas é um fator a ser considerado em vazamentos que ocorrem em áreas fechadas (POMARES *et al*., 2019).

Embora a amônia seja considerada um produto estável, isso não significa que não possa dar origem ou participar de algumas reações perigosas; a amônia reage com produtos como cloro, flúor, bromo, mercúrio e hipocloritos, com os quais pode formar compostos explosivos. Também reage com produtos como sódio, potássio, ácido nítrico, óxido de etileno, acroleína, acetaldeído, etc.

### 2.1.1 Toxicidade da amônia

De acordo com a FISPQ a toxicidade do gás amônia está relacionada à sua altíssima solubilidade e à alcalinidade das soluções resultantes, tornando-o um agente agressivo para mucosas e pulmões. Além disso, a exposição a uma atmosfera que contenha amônia pode causar diversos efeitos físicos, incluindo problemas oculares, de pele, respiratórios e queimaduras no trato digestivo.

Os efeitos da exposição à amônia anidra dependem da duração e intensidade da exposição, bem como de outros fatores individuais, como idade, saúde e outras condições médicas preexistentes.

Os dados relativos à toxicidade para humanos só podem ser usados se estiverem associados a uma concentração, um tempo de exposição, e uma probabilidade de ocorrência de efeitos.

Nos quadros abaixo, os resultados são baseados em observações feitas em caso de acidentes e não em experimentos rigorosos; no entanto, o limiar de irritação foi medido em grupos de voluntários.

O Quadro 1 é retirado do estudo INERIS (1999) sobre a toxicidade aguda da amônia e resume os principais resultados de estudos experimentais em humanos e os diferentes efeitos observados de acordo com a concentração e o tempo de exposição.

Quadro 1 - Principais resultados de estudos experimentais em humanos.

| Concentração (ppm) | Tempo (minutos) | Número pessoas | Efeitos | Referência |
|---|---|---|---|---|
| **Odor** | | | | |
| - | - | - | Percepção (sensíveis) | IPCS, 1986 |
| - | - | - | Percepção | IPCS, 1986 |
| - | 30 | 8 | Incômodo | Verbeck, 1977 |
| Irritação não especificada | | | | |
| 50 | 10 | 6 | Irritação moderada | Mac Ewan, 1972 |
| 30 - 50 | 5 | 10 | Secura nasal | Relatório, 1973 |
| Irritação ocular e produção de lagrimas | | | | |
| 130 | 5 | 10 | Irritação ocular (5 indivíduos/10) | Relatório, 1973 |
| 110 – 140 | 30 | 8 | incômodo | Verbeck, 1977 |
| 150 - 200 | 360 | 6 | Produção de lágrimas, desconforto transitório | Fergunson, 1977 |
| 150 - 200 | - | 7 | Início dos efeitos oculares (não especificado) | Wallace, 1978 |
| 400 | < 1 | 7 | Irritação ocular | Wallace, 1978 |
| 600 | 30 segundos | 7 | Produção de lágrima | Wallace, 1978 |
| 700 | alguns segundos. | 7 | Produção de lágrima | Wallace, 1978 |
| 1000 | Imediato | 7 | Produção de lágrimas, visão prejudicada | Wallace, 1978 |
| Irritação do trato respiratório e distúrbios da função respiratória | | | | |
| 130 | 5 | 10 | Irritação na garganta (8 indivíduos em 10) | Relatório, 1973 |
| 150 | 8 – 11 | 16 | Sinais de função respiratória (exercício) | Cole, 1977 |
| 110 – 140 | 30 | 8 | Irritação na garganta: incômodo | Verbeck, 1977 |
| 500 | 30 | 7 | Irritação das vias respiratórias | Verbeck, 1977 |
| - | - | - | sinais funcionais | - |
| 700 | alguns segundos. | 7 | Ainda respirável | Wallace, 1978 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1000 | 1 – 3 | 7 | Respiração intolerável | Wallace, 1978 |
| Concentração tolerável / intolerável | | | | |
| 140 | 30 - 75 | 8 | Partida da câmara de exposição | Verbeck, 1977 |
| - | - | - | Pontuação intolerável para não especialistas | - |
| 1500 | Instantâneo | 7 | Partida da câmara de exposição | Wallace, 1978 |

Fonte: INERIS, 1999.

O Quadro 2, extraído do Guia sobre os riscos representados pela amônia, publicado pelo SNIE (1991) e mostra os efeitos de acordo com a concentração.

Quadro 2 - Efeitos da amônia em humanos de acordo com a concentração.

| **Concentração (ppm)** | **Efeitos** | **Período de exposição** |
|---|---|---|
| 5 | Odor perceptível para alguns sujeitos. | - |
| 20 | Odor perceptível para a maioria dos sujeitos. | Valor limite ocupacional médio. |
| 50 – 100 | Irritação perceptível para a maioria dos sujeitos, nos olhos. | Tolerável por até 2 horas para sujeitos não acostumados à exposição; indivíduos acostumados podem tolerar concentrações mais altas durante o mesmo período |
| 125 – 144 | Irritação dos olhos, trato nasal e mucosa.<br><br>Irritação da garganta e das vias respiratórias. | Tempo de exposição superior a 1 hora. |
| 201 | Náuseas e dores de cabeça. | - |
| 403 – 705 | Irritação imediata dos olhos, nariz, garganta e vias respiratórias superiores. | A exposição por ½ hora a 1 hora não causa danos graves, embora a irritação do trato respiratório superior possa persistir por 24 horas após um período de exposição de 30 minutos. Pode ocorrer agravamento de problemas respiratórios pré-existentes. |
| 1007- 2013 | Tosse intensa. Irritação severa dos olhos, nariz e garganta, espasmos brônquicos. | Danos aos olhos e ao sistema respiratório podem ocorrer se não forem tratados rapidamente.<br><br>Um período de exposição de 30 minutos pode induzir efeitos muito |

| | | |
|---|---|---|
| | | graves em indivíduos com predisposição para problemas respiratórios. |
| 3020 - 4027 | Tosse intensa. Irritação severa dos olhos, nariz e garganta. | Pode ser fatal após 30 min. |
| 5033 – 12081 | Espasmo respiratório. Asfixia rápida, edema grave, estrangulamento. | Fatal em poucos minutos. |

Fonte: INERIS, 1999; EFMA-IFA, 1990.

## 2.2 Cloro ($Cl_2$)

O gás cloro ($Cl_2$) é composto pela ligação química covalente entre dois átomos de cloro, sendo este o segundo elemento mais leve do grupo dos halogênios na tabela periódica. O gás apresenta uma coloração amarelo-esverdeada. Devido à sua alta eletronegatividade, ele é capaz de oxidar outras substâncias e é solúvel em água, podendo reagir e formar ácido clorídrico e hipocloroso, ambos com vapores corrosivos e tóxicos que podem causar irritações na pele, nos olhos e no sistema respiratório (POMARES *et al*., 2019).

O cloro ($Cl_2$) nem sempre foi utilizado de forma benéfica na indústria, laboratórios ou no dia a dia das pessoas. Em 1915, durante a Primeira Guerra Mundial, o exército alemão utilizou as propriedades tóxicas do cloro como uma arma de guerra na batalha de *Ypres*, na Bélgica. Cerca de 150 toneladas de cloro foram liberadas em 6.000 cilindros de gás, resultando na morte de 800 militares e na incapacitação de cerca de 3.000 outros. Recentemente foi utilizado como arma química para causar destruição na cidade Síria de *Al Latamina* em 2017, resultou em dezenas de mortes e centenas de feridos (POMARES *et al*., 2019).

Por sua variedade de aplicações em processos industriais, o cloro é um elemento químico com grande importância para a sociedade. A Tabela 2 apresenta algumas propriedades físicas e químicas do cloro.

Tabela 2 - Propriedades físicas e químicas do cloro.

| Propriedade | Valor | Propriedade | Valor |
|---|---|---|---|
| Formula química | $Cl_2$ | Ponto de fusão | - 100,7 °C |
| Peso molecular | 70,91 | Pressão de vapor a - 33,8 °C | 760 mmHg |
| Temperatura crítica | 144°C | Densidade relativa do vapor | 2,4 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Ponto de ebulição | -34,1°C | Calor latente de vaporização | 68,7 cal/g |
| Pressão crítica | 76,05 atm | Solubilidade na água a 25°C | 0,65 g/100 ml |

Fonte: *Chlorine Institute* (2014).

À temperatura e pressão atmosférica está no estado gasoso; porém, variando as condições de pressão e/ou temperatura, pode liquefazer a -34,05 ºC e até solidificar a -100,98 °C à pressão atmosférica, ou ainda liquefazer aumentando a pressão, por exemplo, para 6,8 bar a 20ºC. O cloro líquido tem uma cor âmbar clara, enquanto o cloro gasoso tem uma cor mais amarelada em baixas concentrações, tornando-se amarelo-esverdeado quando a concentração de cloro é alta. Dependendo da concentração, o cloro pode não ser visível se estiver abaixo de 25 ppm.

Devido ao peso molecular do cloro e seus valores de densidade ou gravidade, os vapores são aproximadamente 2,5 vezes mais pesados que o ar, por isso tendem a ocupar áreas baixas em caso de vazamento ou escape de gás. Por outro lado, a densidade ou gravidade específica do cloro na forma líquida o torna aproximadamente 1,5 vezes mais pesado que a água, então ele afundará se for derramado na superfície da água. Esses dados devem ser tomados com cautela, pois variam consideravelmente com a temperatura.

Os valores críticos de cloro (Tc, 144°C e Pc, 76,1 atm) indicam as possíveis formas de armazenamento e transporte deste produto; assim, tendo em conta que a temperatura crítica do cloro é de cerca de 144°C, é fácil liquefazer-se a uma pressão de aproximadamente 6 - 7 atm a uma temperatura de 20°C para transporte ou armazenamento. Este fato é importante porque em caso de vazamento de cloro líquido, ele vaporizará e se transformará em gás imediatamente ao ritmo de uma expansão volumétrica de 1:450, com as implicações operacionais que isso tem.

Apesar de não ser inflamável ou explosivo, pode formar misturas explosivas com outros compostos orgânicos e inorgânicos, como hidrogênio, amônia, metano e cloreto de metila, sendo os limites de inflamabilidade desses compostos comparáveis aos encontrados na presença de oxigênio, e as temperaturas de autoignição destes compostos orgânicos são cerca de 200ºC inferiores aos mesmos valores na presença de ar (POMARES *et al*., 2019).

A densidade do cloro gasoso a uma determinada pressão, oscila igualmente com a temperatura; e se tomarmos, por exemplo, a temperatura de 0 ºC à pressão

atmosférica, a densidade é de 3,12 kg/m$^3$, diminuindo à medida que a temperatura aumenta; em qualquer caso, bem acima da densidade do ar. A Figura 5 mostra a densidade em função da temperatura.

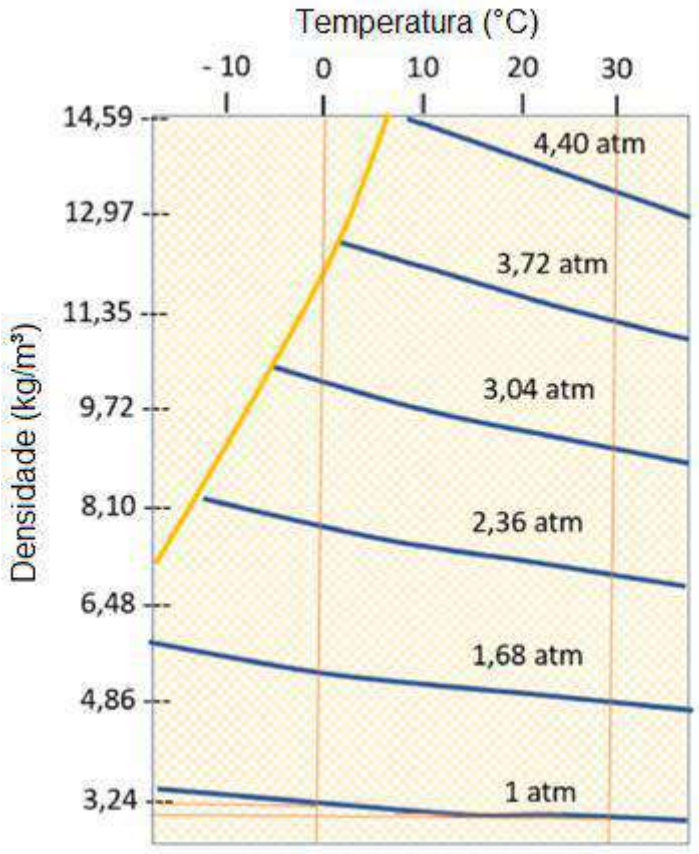


Figura 5 - Densidade do gás cloro.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

Como já mencionado, o cloro à temperatura ambiente é um gás, pois sua pressão de vapor à temperatura ambiente é superior a 760 mmHg. Assim, por exemplo, na faixa de temperatura entre 0 e 40ºC, a pressão de vapor do cloro está entre 2,7 bar e 10,5 bar;

Esses dados aparentemente não dizem muito, já que em ambos os casos o cloro está na fase gasosa, mas conforme a temperatura aumenta a nuvem de cloro avança mais rápido, sua densidade é menor e, portanto, sua dispersão será favorecida à medida que se espalha (Figura 6).

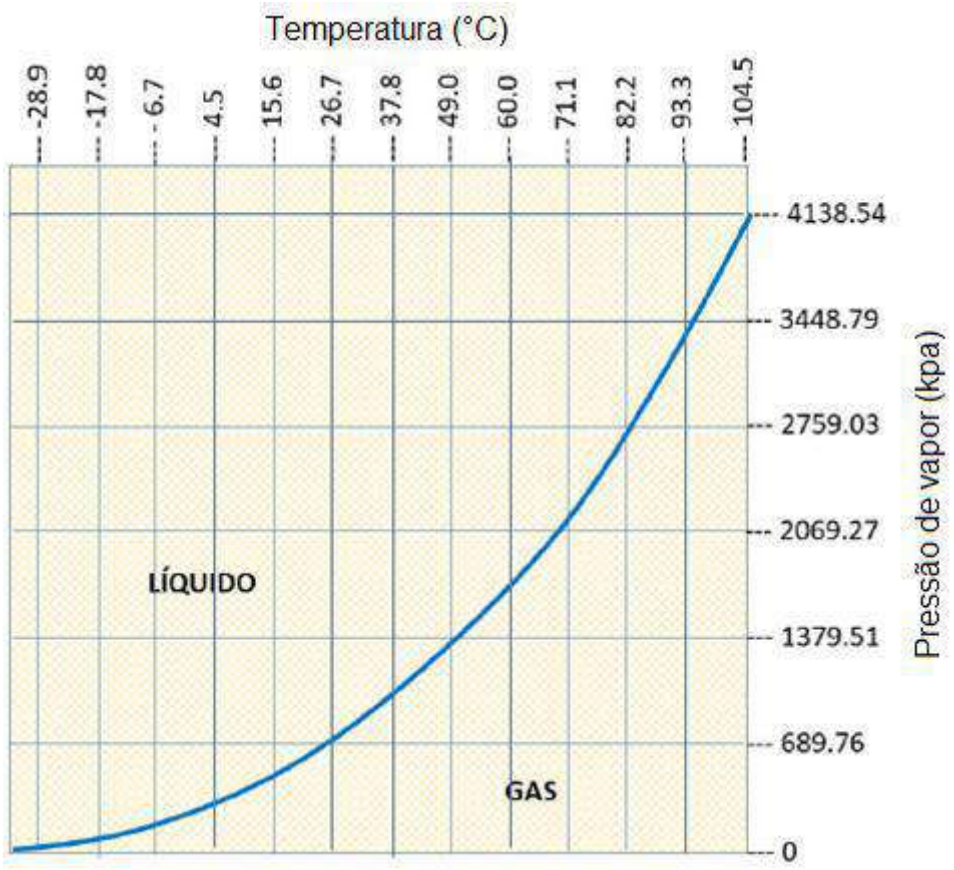


Figura 6 - Curva de pressão de vapor para cloro líquido.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

Em caso de vazamento de cloro líquido, este evaporará rapidamente para a atmosfera, resfriando o próprio cloro líquido, até atingir o equilíbrio líquido/vapor. Por este motivo, uma parte significativa do cloro líquido produzido pelo vazamento permanece neste estado, ou seja, nem todo o cloro líquido vazado se transforma em cloro gás.

O ponto de ebulição do cloro é -34°C. Quando transportado liquefeito à temperatura ambiente, comporta-se como um líquido superaquecido (especificamente 54°C acima de sua temperatura de ebulição). Esta circunstância faz com que cumpra um dos requisitos para dar origem a uma explosão BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*).

Para que esse fenômeno ocorra, é necessário que a ruptura do recipiente leve à evaporação maciça de grande parte do líquido. Para isso, são necessárias condições de pressão e temperatura que, no caso do cloro, são dadas a partir de 22,7 bar e 71,6°C. Esses valores extremos podem ser gerados quando o container é submetido diretamente à ação do fogo ou de altas temperaturas.

A viscosidade do cloro gasoso a 15,6°C é de 0,0132 Cp, muito próxima da do ar à mesma temperatura; entretanto, o cloro líquido tem um valor de viscosidade de 0,3538 Cp, valor bem inferior ao da água na mesma temperatura, o que indica que terá um fácil deslocamento à medida que ocorrer a troca de calor com a atmosfera e sua consequente evaporação (Figura 7).

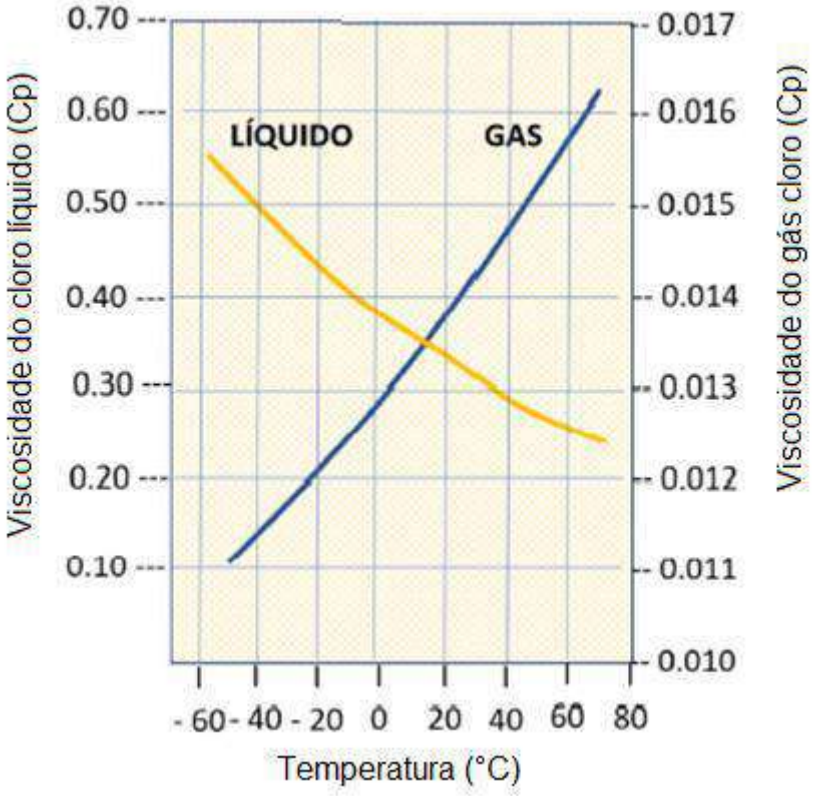


Figura 7 - Viscosidade do cloro.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

### 2.2.1 Toxicidade do cloro

É um gás irritante, pois apresenta alta reatividade com os tecidos biológicos, causando lesões significativas na mucosa respiratória. A localização do dano dependerá da exposição e do grau de hidrossolubilidade, tendo em conta que quanto maior for este valor, mais cedo ocorrerá a absorção do composto, pelo que afetará principalmente as vias respiratórias superiores.

A via de exposição mais importante em relação à exposição ao cloro é a inalação, que pode ser fatal após 5 minutos de exposição a uma concentração de 500 ppm. No entanto, os efeitos produzidos pela exposição ao cloro não dependem apenas da quantidade e via de entrada no organismo, mas também de outros fatores como velocidade de absorção, constituição física, sexo, peso e idade da pessoa

exposta. A evolução da intoxicação pode ser muito diferente dependendo da quantidade que entra no organismo; assim, podemos encontrar três tipos de intoxicação:

**Intoxicação aguda:** quando o aparecimento do quadro patológico é rápido após absorção ou contato com o organismo. A evolução pode levar à morte ou à recuperação total ou parcial do indivíduo;

**Envenenamento crônico:** produz a deterioração progressiva do estado de saúde com evolução lenta, podendo tornar-se irreversível;

**Intoxicação subaguda:** situação intermediária entre intoxicação aguda e crônica.

As principais manifestações clínicas de substâncias irritantes como o cloro podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Manifestações clínicas do gás cloro.

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

Fonte: Fontanive (2005); Chlorine Institute (2014).

O quadro 3 mostra as principais referências sobre os valores toxicológicos do cloro.

Quadro 3 - Valores toxicológicos do cloro.

| Limite | Duração | Valor | Referência |
|---|---|---|---|
| Limite indicativo de exposição laboral (IOEL) | 15 min | 15 mg/m$^3$ (0,5 ppm v/v) | Directiva 2006/15/EC |
| Imediatamente perigoso a vida e a saúde (IPVS – IDLH) | 30 min | 90mg/m$^3$ (30 ppm v/v) 10 ppm | NIOSH, 1998. Tissot & Pichard, 2000; Sexton & Pronchik, 1998; SHD, 2002; Lauwerys, 2003; The clorine institute, 1999. |
| Dose letal mínima | - | 873 ppm | RETECS |
| Dose mínima de toxicidade | - | 15 ppm | PATTY 1981 |
| Exposição de emergência (limite letal e efeitos irreversíveis) | 30 min 30 min | 90 ppm v/v 60 ppm v/v | Euro ChlorProposal, 1991; Ecetoc, 1991. |
| Limite olfativo | - | 0,02 – 0,2 ppm | NIOSH, 1978 |
| Valor limite – TWA | 8h dia/40 h semanais | 0,5 pm | ACGIH |
| Valor teto – VLA - EC | 15 min | 0,5 ppm | INSHT |

Fonte*: Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

# 3. DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

A atmosfera é um sistema altamente complexo, composto por camadas gasosas que envolvem a Terra e se estendem por centenas de quilômetros de altura. Essas camadas são classificadas com base em sua temperatura, densidade e composição química.

Quando se trata da dispersão de poluentes atmosféricos, a classificação leva em conta a variação da temperatura em relação à altitude, uma vez que isso afeta diretamente a dinâmica dos poluentes na atmosfera e sua capacidade de se dispersar. Além disso, a atmosfera contém vários processos físicos e químicos que também afetam a dispersão de poluentes e, consequentemente, a qualidade do ar. Portanto, é essencial compreender a dinâmica da atmosfera para entender como ocorrem os processos de dispersão de poluentes (MAIOLI *et al*., 2005).

Os processos que envolvem a dispersão de poluentes atmosféricos são predominantes na troposfera, que é caracterizada por um decréscimo de temperatura em torno de 6,5 K/km. Este decréscimo ocorre para um valor de 10 K/km para regiões mais próximas do solo, e vai diminuindo seu gradiente com o aumento da altura, o que na média, a torna a ter o valor de 6,5 K/km, que representa a região em contato com a superfície terrestre até uma altitude de 15 km. A convecção vertical mantém o ar relativamente bem misturada quando comparada às outras subcamadas (MAIOLI *et al*., 2005).

## 3.1 Dispersão atmosférica

De acordo com Casal (2008), a dispersão atmosférica de produtos tóxicos na atmosfera ocorre por meio da combinação de dois processos: a difusão e a advecção (transporte pelo vento). Enquanto a nuvem se move predominantemente na direção do vento, a dispersão perpendicular a essa direção é influenciada pela turbulência atmosférica. Vale ressaltar que, em relação aos gases densos, essa movimentação também pode ocorrer contra o vento, mas em menor extensão, conforme apontado por Jones (2013). A Figura 8, mostra como ocorre o processo de dispersão na atmosfera.

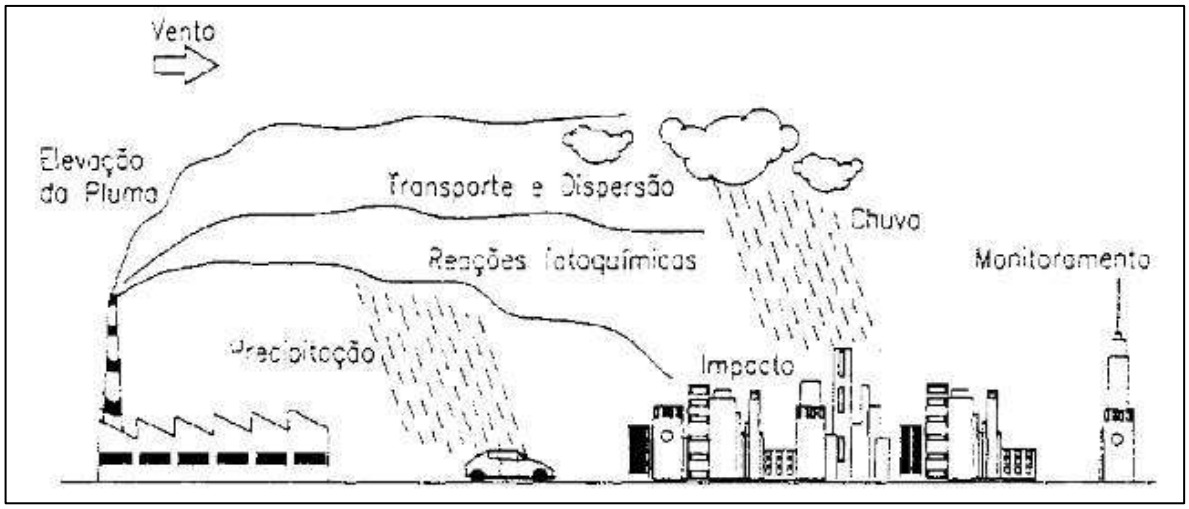


Figura 8 - Modelo de dispersão de gases na atmosfera.
Fonte: Maioli e Nascimento, 2005.

## 3.2 Estabilidade atmosférica

A classificação da estabilidade atmosférica é essencial para quantificar a capacidade da atmosfera em dispersar poluentes e é relevante para previsões de dispersão de curto e longo prazo. Vários métodos de classificação são utilizados, incluindo aqueles que levam em consideração parâmetros e variáveis meteorológicas e avaliação de processos atmosféricos que ocorrem na Camada Limite Atmosférica (CLA). A classificação de Pasquill é uma das mais comuns e avalia as características dispersivas da atmosfera (OLIVEIRA *et al*., 2010).

Pasquill (1961) definiu seis classes de estabilidade atmosférica, classificadas de A a F de acordo com o grau de turbulência atmosférica. Classe A – extremamente instável; Classe B – instável; Classe C – ligeiramente instável; Classe D – neutra; Classe E – ligeiramente estável e Classe F – estável. A Tabela 4 mostra de forma simplificada a classe de estabilidade em função da velocidade do vento, insolação e nebulosidade, de acordo com Pasquill.

Tabela 4 - Classes de estabilidade de Pasquill.

| **Velocidade do vento (m/s)** | **Período diurno Insolação solar** | | | **Período noturno Nebulosidade** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Forte | Moderada | Fraca | Nublado (<4/8) | Pouco nublado (>4/8) |
| < 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 |

Estabilidade D é para dia ou noite, nublados.

Fonte: Pasquill – Gifford (1961).

A classe é determinada através da análise da velocidade do vento, insolação solar (Tabela 5), nebulosidade e período do dia (FONTANIVE, 2005).

Tabela 5 - Insolação solar em função da radiação solar incidente.

| **Insolação Solar** | | |
|---|---|---|
| Forte | Moderada | Fraca |
| > 851 W/m$^2$ | 851 – 526 W/m$^2$ | < 526 W/m$^2$ |

Fonte: Jones *et al*. (2013).

Se a atmosfera for instável (classes A e B de Pasquill), a dispersão atmosférica é favorecida, resultando na formação de uma pluma muito aberta, a forma da dispersão será irregular, o alcance da pluma será menor, porém com largura maior como ilustra a Figura 9 (PASQUILL, 1974).

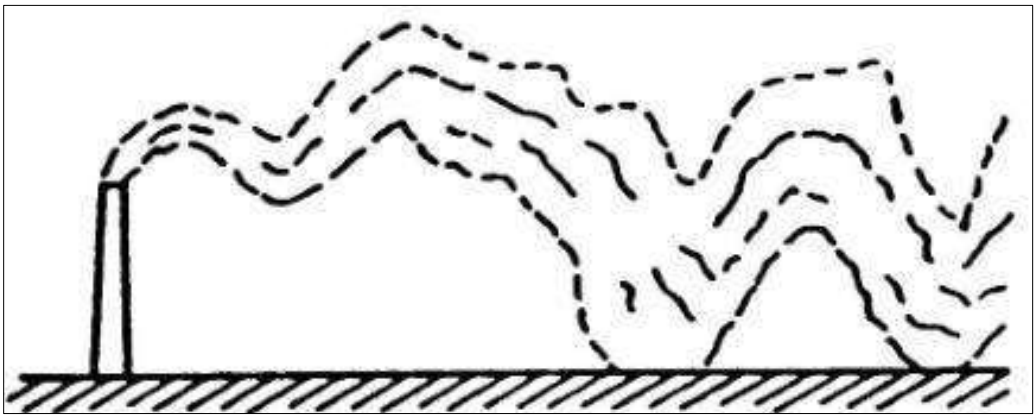

Figura 9 - Dispersão em atmosfera instável.
Fonte: Pasquill, 1974.

Se uma atmosfera é estável, sua capacidade de difundir um poluente verticalmente é baixa, resultando na formação de uma pluma muito fechada, o alcance será maior e a largura da pluma mais reduzida conforme ilustra a Figura 10 (PASQUILL, 1974).

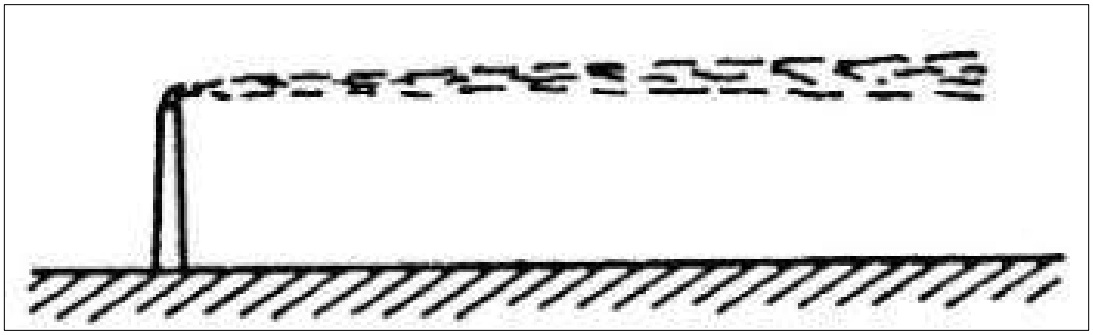

Figura 10 - Dispersão em atmosfera estável.
Fonte: Pasquill, 1974.

## 3.3 Dispersão de gases neutros

Para gases que possuem densidade similar à do ar, geralmente são utilizados modelos gaussianos para prever a dispersão. Nesses casos, assume-se que a dispersão ocorre sem a presença de empuxo e que a gravidade não afeta o processo. O vento e as turbulências atmosféricas são as principais forças que movem as moléculas do gás liberado durante o vazamento, o que é chamado de dispersão passiva ou empuxo neutro (EPA; NOAA, 2007).

Há dois modelos de dispersão frequentemente usados para gases neutros: o modelo de *puff* e o modelo de pluma. O modelo de *puff* descreve a concentração de um único evento de liberação de uma quantidade fixa de matéria em relação ao tempo, com liberações instantâneas. Por outro lado, o modelo de pluma descreve a concentração em estado estacionário de uma liberação contínua (CROWL *et al*., 2002).

A equação gaussiana de dispersão de poluentes (Equação 1) é utilizada para avaliar a concentração de poluentes em diferentes cenários atmosféricos. Ela é baseada em um modelo gaussiano de liberação contínua e simplifica algumas hipóteses, como: a vazão mássica é considerada constante durante o tempo, ausência de reações químicas, ausência da gravidade, condições meteorológicas constantes e uniformidade da rugosidade da superfície (CASAL, 2008).

$$\bar{C}_{(x,y,z)} = \frac{Q_m}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right].\left\{exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\}, \quad (1)$$

onde: $(x, y, z)$ são coordenadas do ponto onde se deseja calcular a concentração; $\bar{C}_{(x,y,z)}$ é a concentração média do contaminante; $H$ representa a altura efetiva da fonte; $Q_m$ é a vazão mássica do contaminante; $\sigma_y$ é o coeficiente de dispersão horizontal e $\sigma_z$ o coeficiente de dispersão vertical; $u$ representa a velocidade do vento.

No modelo gaussiano, a maior concentração de poluentes é encontrada no centro da curva. À medida que a nuvem se propaga, a concentração de poluentes diminui devido à difusão, que ocorre na direção do vento, como mostra a Figura 11.

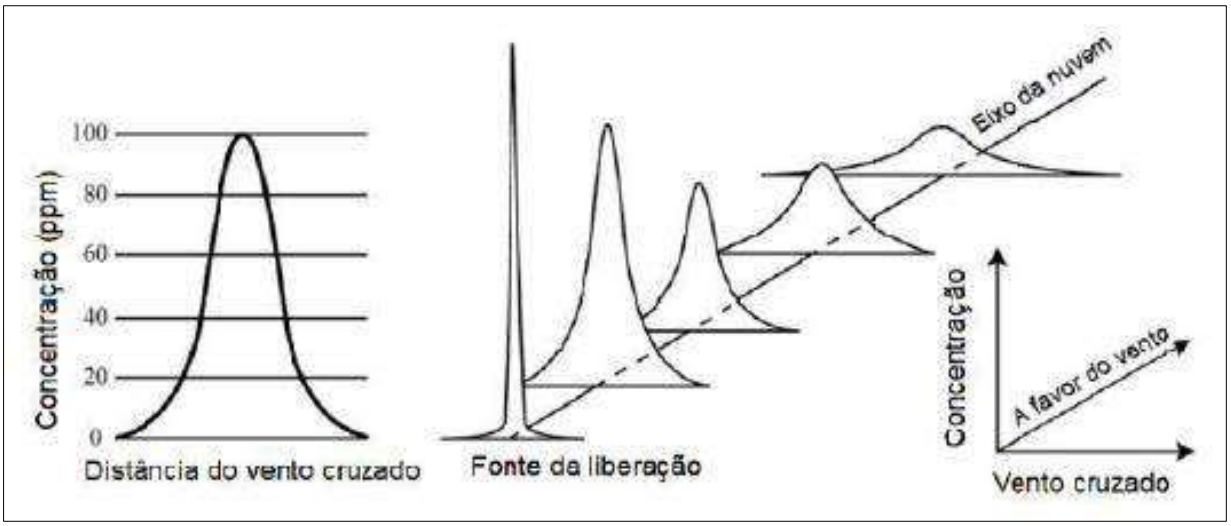


Figura 11 - Distribuição gaussiana e propagação gaussiana.
Fonte: Adaptado de EPA & NOAA (2007).

Para o cálculo dos coeficientes de dispersão (Tabela 6), baseiam-se nas classes de estabilidade de Pasquill-Gifford (Tabela 4), sendo, portanto, dependentes das condições atmosféricas.

Tabela 6 - Coeficiente de dispersão para plumas.

| **Classe de estabilidade** | $\boldsymbol{\sigma_y = \sigma_x\ (m)}$ | $\boldsymbol{\sigma_z\ (m)}$ |
|---|---|---|
| Condições rurais | | |
| A | $0{,}22x\ (1+0.0001x)^{-1/2}$ | $0{,}20x$ |
| B | $0{,}16x\ (1+0.0001x)^{-1/2}$ | $0{,}12x$ |
| C | $0{,}11x\ (1+0.0001x)^{-1/2}$ | $0{,}08x\ (1+0{,}0002x)^{-1/2}$ |
| D | $0{,}08x\ (1+0.0001x)^{-1/2}$ | $0{,}06x\ (1+0{,}0015x)^{-1/2}$ |
| E | $0{,}06x\ (1+0.0001x)^{-1/2}$ | $0{,}03x\ (1+0{,}0003x)^{-1}$ |
| F | $0{,}04x\ (1+0.0001x)^{-1/2}$ | $0{,}016x\ (1+0{,}0003x)^{-1}$ |
| Condições urbanas | | |
| A – B | $0{,}32x\ (1+0.0004x)^{-1/2}$ | $0{,}24x\ (1+0{,}0001x)^{+1/2}$ |
| D | $0{,}22x\ (1+0.0004x)^{-1/2}$ | $0{,}20x$ |
| D | $0{,}16x\ (1+0.0004x)^{-1/2}$ | $0{,}22x\ (1+0{,}0003x)^{-1/2}$ |
| E – F | $0{,}11x\ (1+0.0004x)^{-1/2}$ | $0{,}08x\ (1+0{,}0015x)^{-1/2}$ |

Fonte: Crowl e Louvar (2002 apud BRIGGS, 1973).

## 3.4 Dispersão de gases densos

A modelagem de gases densos difere significativamente da modelagem de gases ideais. De acordo com Britter (1998), existem várias razões pelas quais uma nuvem de gás pode ser mais pesada do que o ar em uma liberação acidental.

Essas razões incluem o peso molecular do material em questão (como o cloro ou o propano, por exemplo), a temperatura em que o material é armazenado (como no caso do gás natural liquefeito armazenado a -160°C), a presença de aerossóis na nuvem resultantes de processos de vaporização instantânea (como é o caso da amônia armazenada sob pressão) e a ocorrência de reações químicas (oligomerizações do ácido fluorídrico, por exemplo).

Os experimentos realizados por Van Ulden (1974) com gases densos evidenciaram uma diferença significativa na dispersão desses materiais em comparação aos gases neutros ou mais leves que o ar. Foi constatado que a dispersão lateral dos gases densos é quatro vezes maior do que a dos gases neutros, enquanto a dispersão vertical é quatro vezes menor, ilustrando o processo de dispersão atmosférica gravitacional (VAN ULDEN, 1987).

Britter e McQuaid (1988) propuseram uma classificação das fases do processo de dispersão atmosférica de uma nuvem densa com base em observações de acidentes e experimentos. No entanto, é importante notar que o processo de dispersão atmosférica pode variar significativamente, dependendo das características

da liberação acidental e do ambiente em que ocorre. As fases principais (Figura 12) são as seguintes:

Na fase 1, o fluido é liberado em alta velocidade formando a nuvem, ou seja, seu termo fonte; na fase 2, ocorre a expansão volumétrica contra a pressão atmosférica; a fase 3 é uma fase dominada pelas forças de empuxo (*buoyancy step*), conhecida como dispersão gravitacional.

Por fim (fase 4 e 5) a nuvem passa por uma fase de transição para atingir a fase de dispersão passiva, onde possui densidade e velocidade similar à do ar ambiente diluindo a concentração de contaminantes até níveis seguros.

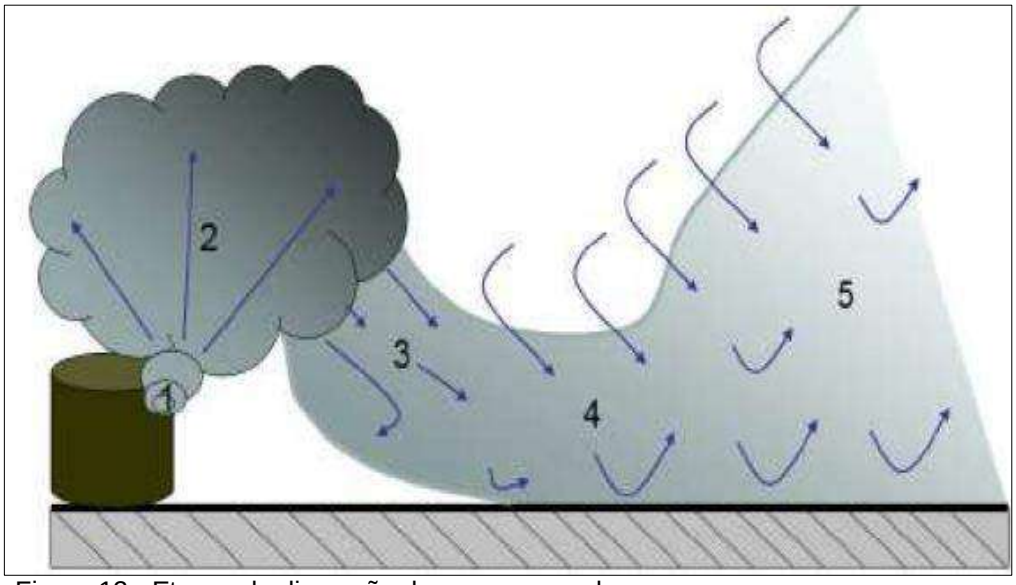


Figura 12 - Etapas da dispersão de uma nuvem densa.
Fonte: Tavares (2011).

## 3.5 Características das liberações bifásicas

A dispersão atmosférica de um gás é influenciada por vários fatores, incluindo as características da liberação, as condições climáticas e a natureza do gás em questão. As características de dispersão podem variar dependendo do tipo de liberação, como a altura da liberação, a velocidade do vento, a temperatura e a umidade do ar (INERIS, 2019).

Existem diversos tipos de liberação acidental, que podem ter efeitos distintos na dispersão do gás na atmosfera.

**Jato de gás amônia de um vaso pressurizado:** a liberação ocorre na fase gasosa e em alta pressão;

**Jato de amônia bifásica de um vaso pressurizado:** a liberação ocorre na fase liquida, mas a amônia é liberada em uma mistura de fase gasosa e líquida;

**Evaporação de uma poça de amônia líquida:** ocorre quando há a liberação de uma quantidade de amônia líquida em um ambiente com temperatura menor ou igual ao seu ponto de ebulição. Evaporiza gradualmente;

**Vazamento de amônia líquida de um tanque criogênico:** amônia líquida a uma temperatura abaixo do ponto de ebulição e à pressão atmosférica, evapora rapidamente.

A amônia tem características de dispersão específicas e, dependendo do tipo de liberação, a dispersão será diferente. A libertação bifásica de amoníaco da fase líquida de um tanque pressurizado divide o jato em três zonas principais conforme a Figura 13.

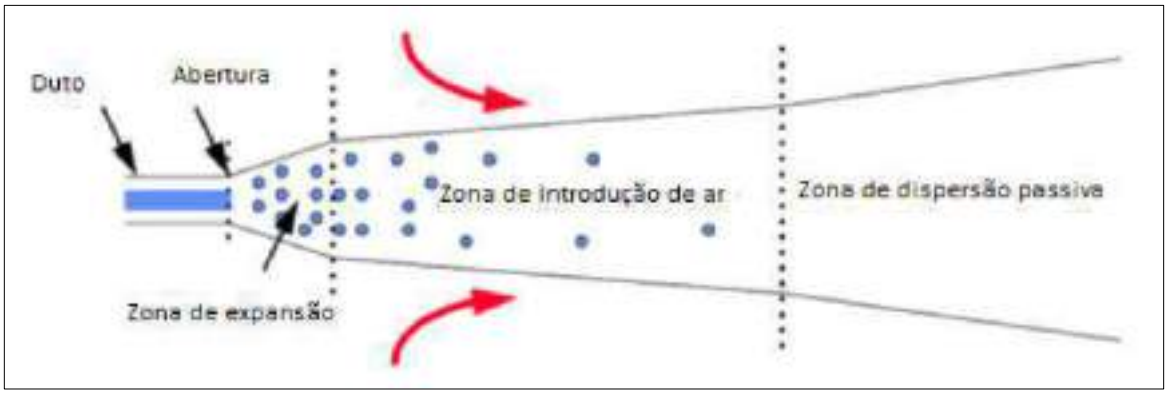


Figura 13 - Jato bifásico de amônia.
Fonte: Bouet, (1999).

**zona de expansão:** nesta zona que se estende por uma distância curta de cerca de 0,5 a 4 vezes o diâmetro da abertura (IANELLO, 1989), o fluido é expandido da pressão na abertura para a pressão atmosférica. Devido a esta despressurização repentina, a fase líquida da liberação está em um estado superaquecido e uma fração desta fase líquida é vaporizada quase instantaneamente.

Essa diferença de velocidade entre as duas fases induz o arrastamento da fase líquida e sua fragmentação em gotículas finas. Essas gotículas são arrastadas pela fase gasosa em alta velocidade e formam o que é chamado de "aerossol".

Ao final dessa zona, o jato é composto por uma fase gasosa e uma fase líquida em forma de aerossol, sendo que todo o jato (fase líquida e fase gasosa) se encontra no ponto de ebulição da substância que foi liberada.

**zona de introdução de ar:** nesta zona o jato turbulento causa a arraste do ar ambiente para dentro do jato. Esse ar é mais quente do que o próprio jato e a energia proveniente dele é inicialmente utilizada para vaporizar as pequenas gotas de líquido presentes no jato. Esse processo de vaporização causa uma diminuição da temperatura do jato, fazendo com que ele se comporte como um jato de gás denso na atmosfera. Depois que todo o líquido no jato foi vaporizado, a energia do ar quente é utilizada para aquecer o jato, que se tornou completamente gasoso.

**zona de dispersão passiva:** à medida que o ar entra no jato, a velocidade deste diminui gradualmente até chegar à mesma velocidade do vento. Quando isso acontece, considera-se que o jato está se dispersando passivamente na atmosfera.

A presença de obstáculos próximos ao local da liberação pode afetar a dispersão inicial e, posteriormente, influenciar a sua dispersão na atmosfera.

Se o obstáculo estiver próximo do lançamento, modificará a fase inicial da dispersão. Por exemplo, uma liberação bifásica em forma de jato, que encontra um obstáculo como uma parede ou piso, pode resultar na formação de poças. Nesse caso, a dispersão da amônia da poça é diferente daquela que teria seguido o jato livre (INERIS, 2019).

Se o obstáculo estiver distante do ponto de lançamento, e se o tamanho da nuvem formada pela amônia for comparável ao obstáculo, o obstáculo apenas modificará o fluxo de massa gasosa e não modificará o estado físico do lançamento. Neste caso, o efeito na dispersão será menor do que no caso anterior, diminuindo conforme a diluição e o tamanho da nuvem ao encontrar o obstáculo (INERIS, 2019).

## 3.6 Características das liberações na fase gasosa

O processo de vazamento pode ser dividido em três fases (Figura 14):

**Aerossol:** É gerado no ponto mais próximo da fonte do vazamento, dependendo do tipo de vazamento e da natureza das partículas em suspensão. A maior parte desse aerossol vai se misturar com a umidade do ambiente, dando origem a uma nuvem branca.

**Gás denso:** Quando ocorre o vazamento, a amônia anidra se mistura com a umidade do ar, formando uma nuvem de hidróxido de amônio mais pesada que o ar; esta nuvem será mais densa quanto maior a umidade do ar. Se a descarga estiver na fase líquida, a amônia começará a ferver, passando da fase líquida para a fase gasosa, criando um aerossol e uma densa nuvem de gás.

**Vapor:** É a fase final, onde a amônia começa a se misturar e se dissipar no ar.

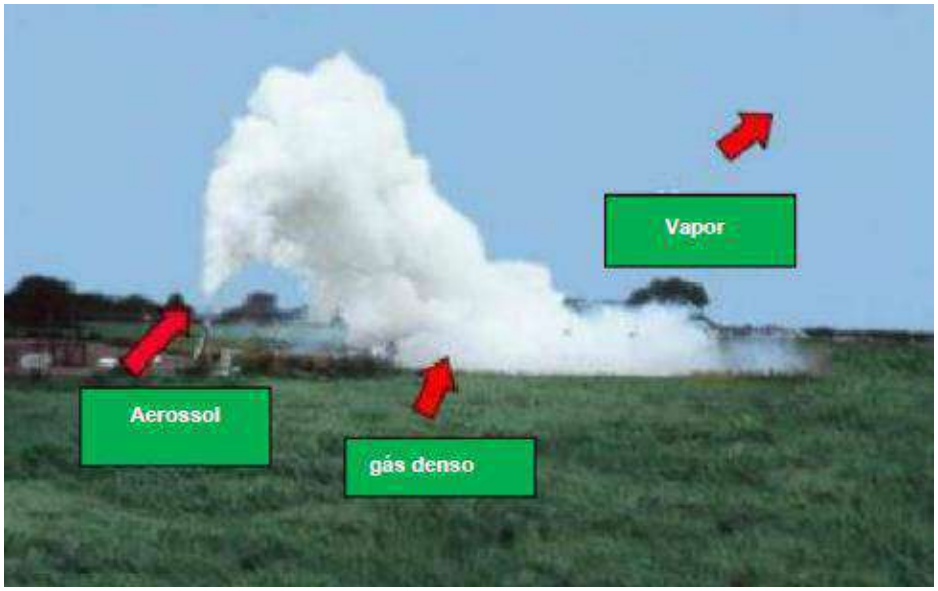


Figura 14 - Fases de vazamento de amônia anidra na fase gasosa.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con amoniaco para bomberos V1 – 2019.*

Nas imagens mostradas a seguir (Fig. 15 a 18), observa-se uma comparação de amônia com o gás cloro, que tem um valor de densidade mais pesado que o ar. Em um vazamento de amônia líquida no fundo de um tanque. As comparações estão no mesmo intervalo de tempo.

Na Figura 15 observa-se que a dispersão da amônia acontece mais rapidamente que a do cloro, tendendo a subir e se dispersar devido à sua densidade e à pressão com que o produto sai do recipiente, mesmo a amônia sendo incolor, com pouca massa de vazamento e umidade mínima no ar, pode-se observar a cor branca da nuvem.

Figura 15 - Vazamento de amônia (direita) e cloro (esquerda) – Fase 1.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con amoniaco para bomberos V1 – 2019.*

Na Figura 16, os vapores de amônia começam a se dispersar na atmosfera e atingem distâncias maiores do que outros gases mais pesados, como o cloro.

Figura 16 - Vazamento de amônia (direita) e cloro (esquerda) – Fase 2.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con amoniaco para bomberos V1 – 2019.*

Na Figura 17, observa-se diferentes comportamentos entre a nuvem de cloro e a nuvem de amônia. O cloro é uma nuvem fina ao nível do solo, a amônia é muito volumosa e se dispersa rapidamente sob condições ambientais de estabilidade atmosférica e umidade relativamente baixa. Parte dos vapores, os mais frios, permanecerão nas áreas mais baixas até que sua temperatura aumente e comecem a subir.

Figura 17 - Vazamento de amônia (direita) e cloro (esquerda) – Fase 3.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con amoniaco para bomberos V1 – 2019.*

Na Figura 18, mesmo distantes da origem, a nuvem de cloro vai perdendo a cor, ainda tóxica, enquanto a nuvem de amônia permanece esbranquiçada (colorida) a uma distância maior.

Figura 18 - Vazamento de amônia (direita) e cloro (esquerda) – Fase 4.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con amoniaco para bomberos V1 – 2019.*

No caso de um vazamento de tanque contendo amônia, é importante considerar que a expansão entre as fases líquida e gasosa é quase duas vezes maior do que a do cloro. Isso significa que o vazamento pode ter comportamentos diferentes dependendo se ocorrer na zona superior, onde a fase é gasosa, ou na zona inferior, onde a fase é líquida.

A densidade relativa dos vapores e da amônia anidra líquida são inferiores à do ar ou da água, essa densidade é modificada conforme a temperatura e a pressão, fatores que condicionarão sua dispersão na atmosfera. A viscosidade também influenciará na dispersão das nuvens, que, no caso da amônia, tanto líquida quanto gasosa, não é muito diferente da média de outros fluidos (POMARES *et al*., 2019).

## 3.7 Dispersão atmosférica – Cloro ($Cl_2$)

Os acidentes envolvendo tanques de cloro são geralmente causados por trincas ou quebras no tanque ou em algum dos seus componentes, como válvulas ou conexões. Esse tipo de acidente pode resultar em uma emissão ou descarga do produto (entendendo por emissão a saída do cloro em estado gasoso e despejando a saída em estado líquido).

No caso de um vazamento líquido, ocorre um vazamento bifásico, porque ao perder a contenção, sofre expansão devido à queda brusca de pressão (da pressão de vapor correspondente à temperatura de armazenamento até à pressão atmosférica), produzindo sua evaporação repentina, que ao mesmo tempo pode formar e arrastar uma quantidade considerável de líquido na forma de aerossol.

Vazamentos na fase gasosa tendem a diminuir devido à ação de resfriamento produzida pela evaporação; enquanto as de líquido permanecerão praticamente constantes, o que facilita o estancamento de um vazamento de gás.

Quando ocorre um vazamento instantâneo de gás, é necessário avaliar o perfil temporal da concentração da nuvem de gás em diferentes distâncias do ponto de origem e na direção do vento. Esse perfil é caracterizado por uma diminuição na concentração máxima de gás e um aumento no tempo necessário para que a nuvem alcance cada ponto à medida que a distância em relação ao ponto de origem aumenta (Figura 19).

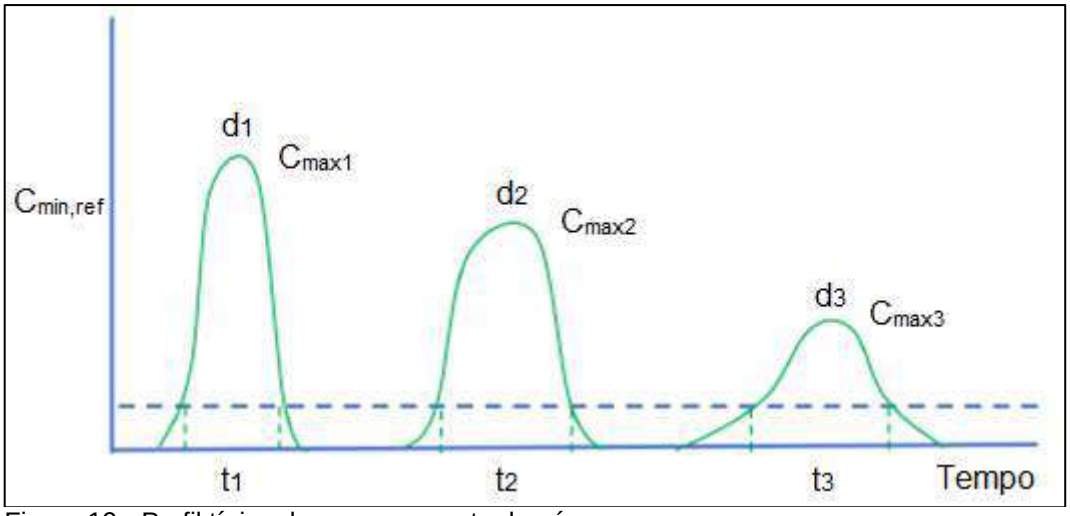


Figura 19 - Perfil típico de um vazamento de gás
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

Se houver um vazamento contínuo de gás a partir da fase líquida no eixo vertical do tanque (180°), o líquido irá se expandir para gás. A densidade do gás em relação ao ar e sua tendência de se acumular em áreas mais baixas devem ser consideradas, uma vez que a concentração de gás diminui à medida que a distância do ponto de vazamento aumenta e o gás se dispersa no ambiente. A coloração do gás também pode indicar sua concentração, sendo mais verde-amarelada na fase inicial, quando a concentração é muito alta.

Se houver um vazamento contínuo de gás cloro na parte superior do eixo vertical do tanque (0°), o gás se dispersará na atmosfera e eventualmente cairá no solo devido à sua densidade mais alta. Nesse caso, a concentração de gás próximo ao tanque será menor do que a medida a alguns metros de distância do mesmo (Figura 20).

Figura 20 - Vazamento descontínuo de gás cloro.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

Na presença de ventos predominantes em uma direção e vazamentos ocorrendo em um ângulo de cerca de 90° em relação a essa direção, pode ocorrer a formação de uma pluma de gás que pode variar em tamanho e se estende na direção do vento. Conforme a pluma se move, ela gradualmente se mistura com o ar ambiente e se dissipa, como ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Vazamento de gás cloro.
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

De maneira geral, quando há maior estabilidade atmosférica, a nuvem de gás leva mais tempo para se dispersar e se diluir no ambiente. Isso costuma ocorrer mais frequentemente durante a noite, onde as distâncias das zonas de segurança são geralmente maiores.

## 3.8 Principais ensaios de dispersão atmosférica

O Instituto Nacional de Meio Ambiente e Riscos Industriais (INERIS) sob a supervisão do Departamento de Transição Ecológica da França acoplou em um relatório os principais testes de dispersão atmosférica em larga escala.

Esses estudos têm como objetivo avaliar a dispersão em diferentes condições meteorológicas e situações. Foram realizados testes de nuvem densa, onde a liberação ocorreu em alturas variadas em relação ao solo; testes de liberação instantânea para avaliar a dispersão após uma liberação repentina; testes em túneis de vento e simulações numéricas para avaliar a dispersão em situações como a liberação em um armazém fechado.

Todos esses testes e simulações foram realizados para ajudar a entender como acorre a dispersão na atmosfera e quais são os riscos associados a vazamentos. Os resultados desses estudos foram utilizados para desenvolver medidas de prevenção e resposta a acidentes (BOUET, 2005).

Abaixo segue resumidamente os principais testes mencionados na literatura:

### Testes de A. Resplandy

A fim de determinar as medidas a serem recomendadas para a segurança da vizinhança de tanques de armazenamento de amônia liquefeita, A. Resplandy, Inspetor Oficial de Instalações Classificadas e Presidente do Comitê Consultivo para Instalações Classificadas, realizou duas séries de experimentos de dispersão de amônia líquida. O primeiro ocorreu no acampamento do exército de Boissise-la-Bertrand em junho de 1967 e o segundo no acampamento do exército de Mourmelon em março de 1968.

O objetivo dos experimentos era especificar as condições em que a amônia é difundida na atmosfera a partir de um derramamento de fase líquida para determinar o raio das zonas de isolamento a serem estipuladas em torno de tanques de armazenamento pressurizados e examinar até que ponto o reabastecimento de amônia líquida pode ser considerado.

Os testes de dispersão atmosférica conduzidos por A. Resplandy estão entre os primeiros. Eles resultaram em observações qualitativas em vez de dados quantitativos puramente interpretáveis. Poucos parâmetros foram medidos e registrados. Em particular, não houve caracterização precisa da atmosfera ou medições precisas da concentração de amônia a sotavento do vazamento.

Estes testes permitiram sobretudo dar ideias sobre o comportamento do amoníaco em caso de libertação acidental e delinear as perspectivas a estudar. Desta forma, A. Resplandy propõe três áreas de estudo para completar o estudo realizado:

1) especificar a influência da vazão de vazamento nas características do aerossol formado;

2) observar mais detalhadamente a influência das condições meteorológicas nas características do aerossol;

3) determinar as condições ideais para retornar os tanques pressurizados à pressão atmosférica.

**Testes do Deserto da Tartaruga**

Nos testes do *Tortoise Desert* (GOLDWIRE, 1996), as quantidades liberadas ficaram entre 10.000 e 41.000 kg. Uma série de 4 testes de dispersão de amônia foram realizadas durante o verão de 1983 pelo *Lawrence Livermore National Laboratory* nos Estados Unidos. Eles foram usados para estudar a dispersão de liberações de amônia líquida pressurizada na atmosfera.

Os dois primeiros testes foram realizados em um local saturado de água devido a fortes chuvas. O local estava quase completamente seco para o terceiro teste e completamente seco para o quarto teste, de modo que as condições climáticas gerais eram mais variáveis do que o planejado.

O teste nº 4, o mais significativo em termos de quantidade liberada, foi realizado nas condições atmosféricas mais estáveis. Demonstrou que o jato estava visível até uma distância superior a 100 m da fonte. A concentração máxima de gás observada a 100 m foi de 6,5%.

Segundo Goldwire (1986) e Koopman (1986), a nuvem havia se espalhado por uma largura de 400 m quando atingiu 800 m, sua altura ainda era 6 m, os efeitos do gás pesado e do jato dominaram a dispersão.

Goldwire e outros. (1986) demonstraram a necessidade de modelos “aprimorados" para prever os efeitos de liberações acidentais. Além disso, Hanna (1993) também usou resultados de Goldwire para comparar os resultados dos modelos e resultados experimentais.

Com relação aos resultados demonstraram que as condições meteorológicas são um fator muito importante na dispersão atmosférica em distâncias maiores, ou seja, além de 100 metros. Não é suficiente caracterizar o termo fonte em detalhes

para modelar a dispersão atmosférica de amônia, as condições climáticas também são necessárias.

**Testes Unie van Kuntmest Fabrieken bv, Holanda, 1972**

Os testes da *Unie van Kunstmest Fabrieken bv*, Holanda, em 1972 foram conduzidos por JW Frenken e relatados por Blanken (1980). O objetivo desses testes era medir a quantidade de amônia coletada no solo no caso de dois lançamentos de um minuto cada, liberando 38,4 kg (0,64 kg/s). O método de medição para a quantidade de amônia coletada não é especificado. Nenhuma medição da concentração no ar foi feita.

**Testes da Imperial Cheminical Industries, Reino Unido, 1974**

Os testes da *Imperial Chemical Industries*, Reino Unido, foram relatados por Reed (1974). O objetivo dos testes foi a caracterização da eficácia de diques de retenção de tanques de armazenamento pressurizados. Nenhuma outra observação foi feita e nenhuma medição de concentração de ar foi feita.

**Testes Unie van Kunstmest Fabrieken bv, Holanda, 1980**

Os testes da *Unie van Kunstmest Fabrieken bv*, Holanda, relatados por Blanken (1980), usaram amônia armazenada a 13,4 bar a 38°C e liberada através de um tubo capilar de 100 mm de comprimento e 2 mm de diâmetro no ar úmido.

O objetivo dos testes era estudar o tamanho das gotas no jato. Apenas resultados qualitativos foram obtidos.

No ar úmido, o jato era opaco e a amônia líquida não era coletada. Supunha-se que o aerossol de amônia inicialmente formado era rapidamente vaporizado quando diluído com ar. Além disso, concluiu-se que a opacidade foi causada pela condensação de água, que forma um aerossol aquoso de amônia.

**Testes de Landskrona, Suécia, 1982**

Os testes de Landskrona, Suécia, 1982, foram conduzidos pelo Instituto Sueco de Pesquisa de Defesa Nacional e foram relatados por Nyrén (1983).

O objetivo desses testes foi medir a vazão de uma liberação de amônia bifásica e compará-la com um modelo teórico.

Os lançamentos foram produzidos a partir de um tubo com diâmetro interno variando entre 32 e 40 mm. Cada liberação durou de 60 a 90 s e para todos os testes,

com exceção de quatro, a pressão do tanque variou consideravelmente. Para os quatro restantes, a pressão de saída foi de 2,2 bar e a vazão mássica de 2,2 kg/s. O jato tocou o solo em um ponto localizado entre 6 e 10 m do ponto de lançamento. Nenhuma piscina foi observada. Não foram feitas medições de concentração.

**Testes do programa FLADIS**

As liberações de amônia foram produzidas no âmbito de um programa de teste europeu denominado FLADIS (Pesquisa sobre a dispersão de liberações intermitentes bifásicas).

No total, 27 liberações horizontais de amônia liquefeita pressurizada foram produzidas.

As vazões de liberação variaram de 0,25 a 0,55 kg/s através de orifícios de 4,0 e 6,3 mm de diâmetro. O teste mais longo durou 40 minutos.

Um dos objetivos do programa FLADIS era estudar detalhadamente o jato de aerossol no campo próximo, a fase de dispersão de gás pesado e a transição da dispersão passiva. Para isso, os sensores foram posicionados em forma de arco centrado no ponto de lançamento a 20 m, 70 m e 240 m.

Medições da composição do aerossol no jato bifásico foram feitas durante os testes. Com base nessas medições, observou-se que o aerossol, que consistia em amônia quase pura próximo ao ponto de liberação, consistia, em poucos metros, em água quase pura. Além disso, nenhum aumento na nuvem de amônia foi observado durante as liberações.

**Testes realizados na Ecole des Mines, Alès**

A *Ecole de Mines, Alès*, realizou várias campanhas de teste de dispersão de amônia desde 1996. Os testes são realizados usando um ou dois cilindros de amônia de 44 kg colocados de cabeça para baixo para produzir liberações de fase líquida (Bara; Dussere, 1996).

O objetivo desses testes é estudar a eficácia das mangueiras de cauda de pavão usadas pelos bombeiros. A jusante das mangueiras de rabo de pavão localizadas a aproximadamente 1 m dos cilindros, observou-se uma redução nas concentrações de amônia no eixo de liberação, por um fator maior que 10 a 13 m de distância dos cilindros e um fator de pelo menos 3 a uma distância de 20 metros. Por outro lado, não foi observada redução significativa além dos 50 m.

**Outros testes de dispersão atmosférica**

A liberação de amônia na atmosfera geralmente resulta na formação de uma nuvem fria, mais pesada que o ar. Portanto, a dispersão é realizada como a de um gás pesado até atingir um nível de diluição suficiente para que a dispersão da amônia seja governada apenas pelas características do fluxo atmosférico (dispersão passiva).

Por esta razão, os ensaios de dispersão atmosférica realizados em gases pesados são de interesse para o estudo da dispersão atmosférica. Isso é particularmente verdadeiro para todos os aspectos relacionados à fase inicial de lançamento.

O Quadro 4 resume os principais testes de dispersão relativos a gases densos. Os testes do *Tortoise Desert* estão incluídos para fins de comparação. Os testes citados na Tabela levam em conta as seguintes observações:

1) Apenas os testes *Tortoise Desert* e *Goldfish* envolveram liberações em duas fases;

2) Os testes de liberação líquida na água (*Burro*, *Coyote* e *Maplin Sands*) não oferecem nenhuma conclusão para a amônia que tem um comportamento muito diferente com a água;

3) Dos testes, apenas os de *Thorney Island* usaram obstáculos.

A informação obtida destes testes, em termos de dispersão, diz respeito a aspetos gerais. Dentro do escopo desses testes, não é possível contabilizar a especificidade da amônia, como formação de jato, geração de aerossol, reações com a umidade do ar, etc.

Quadro 4 - Resumo dos principais testes de dispersão relativos a gases pesados.

| | **Burro** | **Coyote** | **Tortoise Desert** | **Goldfish** | **Handford** | **Maplin Sands** | **Prairie Grass** | **Thorney Island (instantâneo)** | **Thorney Island (contínuo)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Substância** | GNL | GNL | Amônia | Fluoreto de hidrogénio | Krypton 85 | GNL E GLP | Dióxido de enxofre | Freon e nitrogênio | Freon e nitrogênio |
| **Liberação** | Ebulição líquido | Ebulição líquido | Bifásico | Bifásico | Gasoso | Liquido fervente | Jato bifásico | Gasoso | Gasoso |
| **Número de teste** | 8 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 e 8 | 44 | 9 | 2 |
| **Quantidades (kg)** | 10700 para 17300 | 6500 para 12700 | 10000 para 36800 | 3500 para 3800 | 11 para 24 Curies | LNG:2000 para 6600<br><br>LPG: 1000 Para 3800 | 23 para 63 | 3150 para 8700 | 4800 |
| **Tempo (s)** | 79 a 190 | 65 a 98 | 126 a 381 | 125 a 360 | 598 para 1191 | 60 para 360 | 600 | instantâneo | 460 |
| **Superfície** | pequena trechos de água | pequena trechos de água | areia úmida | leito de lago seco | Deserto com arbustos | pequena trechos de água | Grama | Grama | Grama |
| **Classes de estabilidade** | C - E | C - D | D - E | D | C – E | D | A - F | D - F | E - F |
| **Máxima observação n distância** | 140 - 800 | 300 - 400 | 800 | 3000 | 800 | 400 – 650 | 800 | 500 - 580 | 472 |

Fonte: INERIS – Divisão de Riscos de Acidentes, 2015.

# 4. SOFTWARE ALOHA

O ALOHA é um aplicativo de *software* de domínio público desenvolvido pela *Emergency Response Division* (ERD), antiga *Hazardous Materials Response Division* (HAZMAT), que é uma divisão dentro da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) em parceria com o Escritório de Gerenciamento de Emergências da *Environmental Protection Agency* (EPA).

O objetivo do *software* ALOHA é fornecer estimativas da extensão espacial de produtos químicos em casos de derramamentos e vazamentos acidentais de produtos inflamáveis e voláteis. Ele é capaz de avaliar riscos relacionados à saúde humana causados pela inalação de vapores químicos e tóxicos, são apresentados no que é chamado de zonas de perigo (*threat zones*), sempre desenhadas com a direção do vento para a direita, porém, o mesmo deixa claro que esta direção não necessariamente corresponde à direção cardinal do vento (JONES *et al*., 2013).

Possui uma interface gráfica que requer poucos dados de entrada com o objetivo de minimizar o erro do usuário, sendo projetado para ser intuitiva e rápida. O *software* possui vários bancos de dados que são atualizados periodicamente e que contêm informações sobre produtos químicos, fontes de emissão e condições meteorológicas, entre outros parâmetros relevantes para a modelagem da dispersão atmosférica.

Em relação a vazamentos, o ALOHA pode simular até quatro tipos de fonte: fonte direta (*source direct*), poças (*puddle*), vasos de pressão *(tanks*) e gasodutos (*gas pipeline*). O programa limita o tempo de emissão de qualquer fonte a um valor entre 1 minuto (considerada liberação instantânea) e 1 hora.

A gravidade pode afetar a movimentação dos produtos químicos que possuem densidade diferente do ar. Produtos químicos mais pesados do que o ar ambiente tende a se depositar no solo e se espalhar horizontalmente, enquanto os mais leves tendem a se dispersar verticalmente.

Os aerossóis e outros produtos químicos com alto peso molecular podem ser suficientemente densos para serem influenciados pela gravidade, resultando em uma deposição no solo, em vez de dispersão no ar, podendo gerar concentrações mais elevadas de substâncias químicas próximas ao solo e aumentando o risco de exposição humana e ambiental.

Para as dispersões, as simulações são baseadas em dois modelos matemáticos. O modelo gaussiano desenvolvido por Palazzi (1982), usado para simulação de dispersão neutra ou passiva e o modelo *Heavy Gas*, baseado no modelo DEGADIS (*Dense Gas Dispersion*) de Spicer e Havens (1989), para modelagem atmosférica de gases pesados (JONES *et al*., 2013).

## 4.1 Modelo de pluma gaussiana

O modelo gaussiano do *software* destina-se a ser usado com nuvens de vapor que não afetam significativamente o fluxo de ar ambiente e não são afetadas pela gravidade, são considerados poluentes passivos.

O modelo utilizado para descrever a dispersão de cada nuvem é baseado em um modelo de dispersão gaussiana desenvolvido por Palazzi (1982) que descreve o comportamento de liberações de estado estacionário de curta duração. Este modelo é representado na Figura 22.

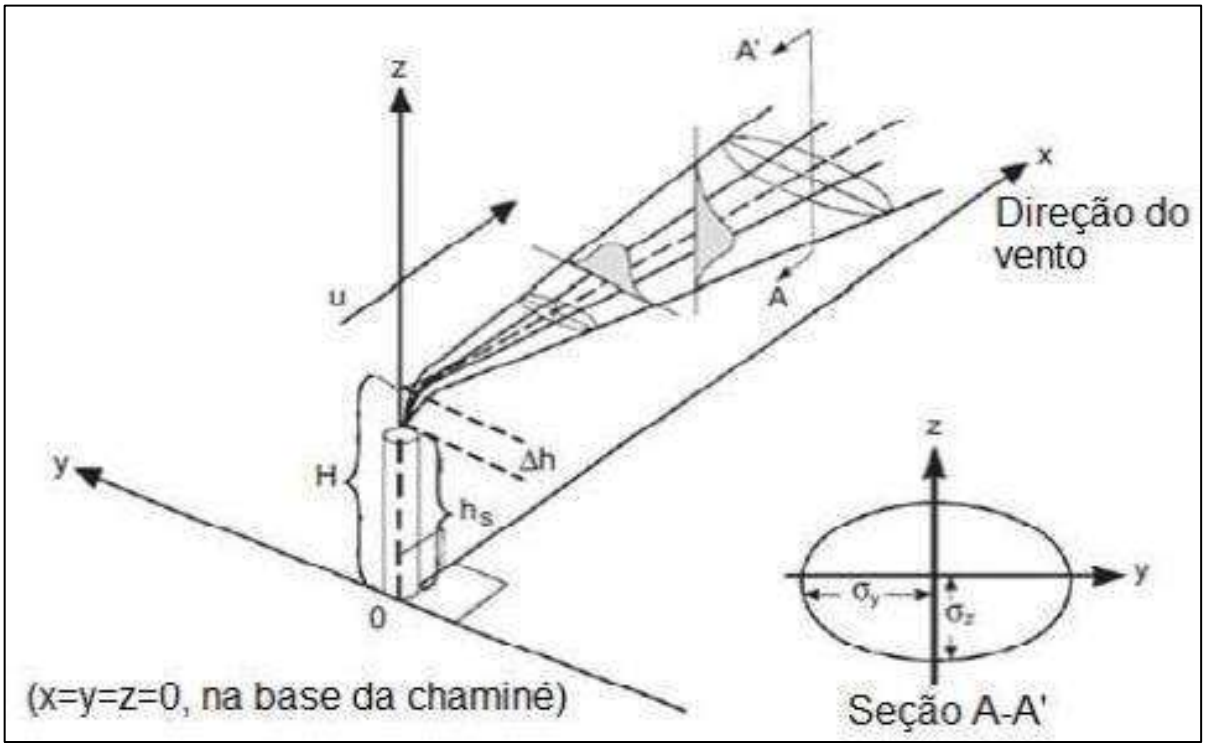


Figura 22 - Comportamento da pluma de dispersão de uma emissão atmosférica em função da distribuição gaussiana.
Fonte: Adaptado de Turner, 1970.

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

onde os parâmetros $\sigma_x, \sigma_y$ e $\sigma_z$ são usados para modelar a difusão turbulenta de uma substância química. O tempo de duração da liberação é representado por $t$, enquanto $U$ é a velocidade do vento.

O termo $\chi$ (Equação 3) representa uma distribuição gaussiana que começa em um ponto específico e é constante no tempo (HANNA *et al*., 1982).

$$\chi\,(x,y,z,t) = \left(\frac{Q(t)}{U}\right) g_y(x,y) g_z(x,z) \quad (3)$$

onde, $Q(t)$ é taxa de liberação da fonte e $g_y$ é obtido através da equação abaixo (Equação 4).

$$g_y(x,z) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi\sigma_y(x)}} exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y(x)}\right)^2\right] \quad (4)$$

Quando não há inversão, $g_z$ é obtido através da Equação 5. Em que, $h_s$ é a altura da liberação.

$$g_z(x,z) = \frac{1}{\sqrt{2\Pi\sigma_z(x)}}\left\{exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h_s}{\sigma_z(x)}\right)^2\right] + exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h_s}{\sigma_z(x)}\right)^2\right]\right\} \quad (5)$$

## 4.2 ALOHA - DEGADIS

O modelo ALOHA-DEGADIS, derivado do modelo DEGADIS, é o modelo de dispersão de gás denso embutido no ALOHA, é um modelo para dispersão atmosférica de nuvens densas desenvolvido por Havens e Spicer (1985) adaptando os conceitos do modelo HEGADIS *(Heavy Gas Dispersion*), de Colender (1980), Colenbrander e Puttock (1983). A Figura 23 mostra o modelo proposto por Colenbrander.

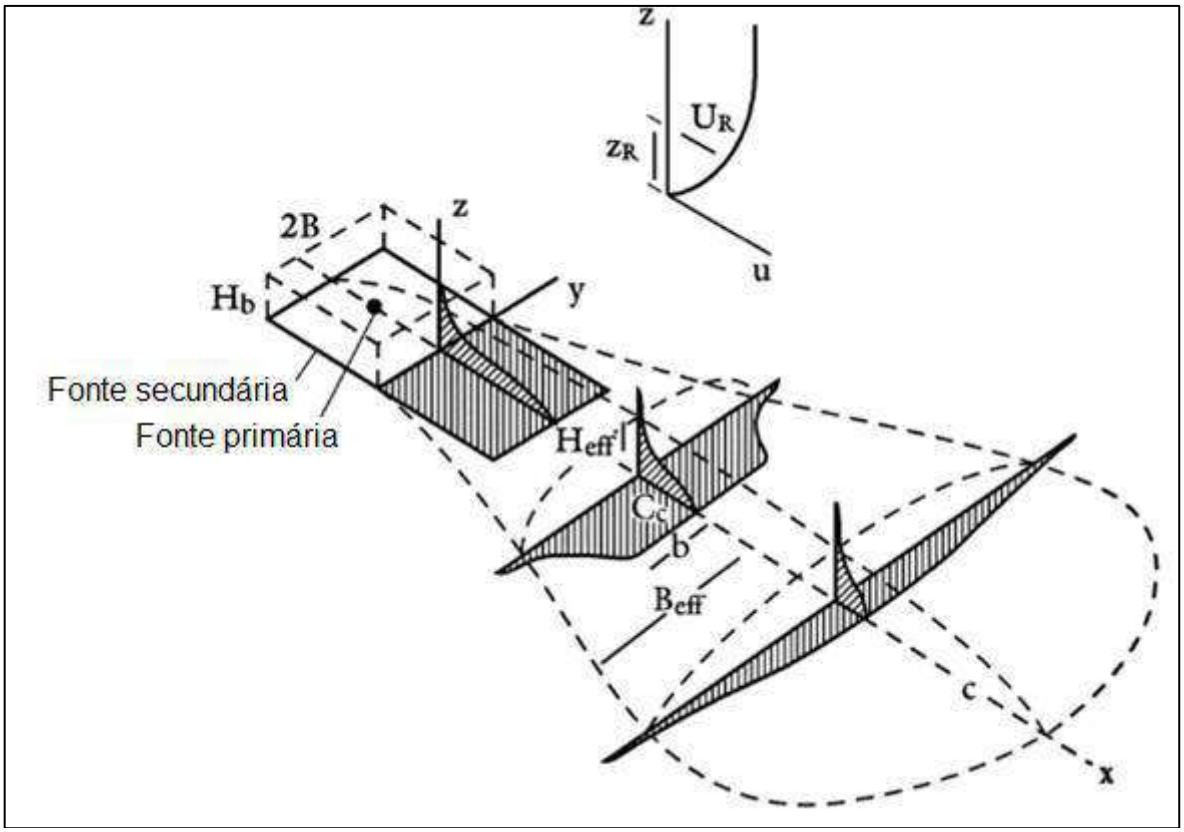


Figura 23 - Modelo de pluma proposto por Colenbrander.
Fonte: Colenbrander 1980.

O DEGADIS possui uma característica única em sua modelagem original: um modelo secundário de fonte que consiste em uma camada de vapor acima da fonte primária, que alimenta a pluma acima dela sem sofrer advecção. O modelo utiliza um perfil exponencial para a velocidade do vento e funções de similaridade gaussiana na horizontal e exponencial na vertical para descrever esse processo (HAVENS, 1988).

O modelo DEGADIS e o modelo ALOHA operam de maneiras diferentes na análise de dispersão de gases. Enquanto o ALOHA varia a vazão ao longo do tempo, o DEGADIS é baseado em condições de regime permanente. Para alcançar o objetivo do *software*, foi feita uma combinação dos modelos ALOHA e DEGADIS, resultando no modelo ALOHA-DEGADIS (JONES *et al*., 2013).

O ALOHA-DEGADIS considera o efeito da gravidade nas nuvens de dispersão de gases densos, mas é limitado apenas ao nível do solo.

$$C(x,y,z) = \begin{cases} C_C\,(x)\exp\left(-\dfrac{|y|-b(x)}{S_y(x)}\right)^2 - \left(\dfrac{z}{Sz}\right)^{1+n} & |y| > b(x) \\ C_C\,(x)\exp\left(-\left(\dfrac{z}{Sz}\right)^{1+n}\right) & |y| \leq 0 \end{cases} \tag{6}$$

onde, $C_C(x)$ é a concentração ao nível do solo, na linha central (ppm); $S_Y(x)$ é o parâmetro de dispersão lateral (m); $S_z(x)$ é o parâmetro de dispersão vertical (m); *b* é a metade da largura da seção central homogênea (m).

Segundo Jones (2013) O modelo de dispersão de gás pesado foi selecionado pela aceitação geral e pelos testes realizados; testes Burro / Coyote, Maplin Sands e Thorney Island (SPICER; HAVENS, 1987).

## 4.3 Níveis tóxicos

O ALOHA emprega Níveis Tóxicos de Preocupação (*Levels of Concern),* (LOCs) para avaliação das zonas de ameaça. Essas diretrizes foram criadas para prever como o público em geral irá responder a uma liberação tóxica única e de curta duração. As diretrizes mais utilizadas para exposição pública (AEGLs, ERPGs e TEELs) têm três níveis de valores de exposição para cada produto químico (NOAA, 2022).

As zonas de ameaça vermelha, laranja e amarela indicam as áreas onde se prevê que a concentração de poluentes no nível do solo exceda o LOC correspondente em algum momento após o início da liberação (Figura 24).

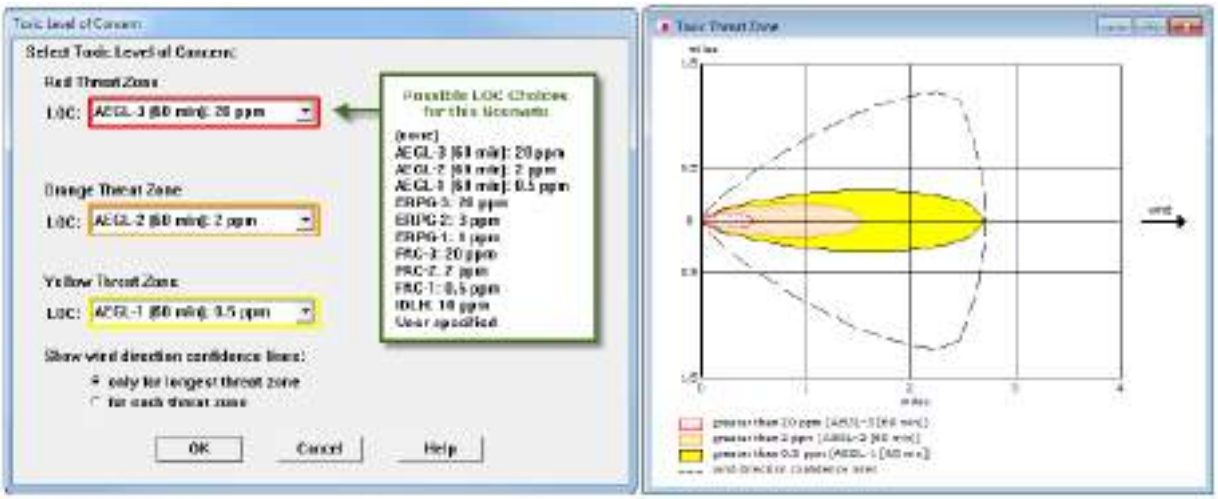


Figura 24 - Seleção dos LOCs e Zona de ameaça.
Fonte: NOAA, 2022.

O PAC (*Protective Action Criteria*) - Critério de ação protetiva - é um conjunto de dados que segue uma hierarquia baseada em três sistemas comuns de diretrizes de exposição pública: AEGLs, ERPGs e TEELs. Esses sistemas estabelecem valores de referência para exposição a substâncias perigosas e cada um deles pode ter valores específicos para uma determinada substância.

O conjunto de dados PACs implementa a seguinte hierarquia ao escolher quais valores usar para os PACs: 1) Valores AEGL finais de 60 minutos; 2) Valores provisórios de AEGL de 60 minutos; 3) valores ERPG; 4) valores TEEL. Um sistema hierárquico pode ser útil para escolher níveis de preocupação para produtos químicos definidos em duas ou mais diretrizes de exposição pública (NOAA, 2022).

Os valores de AEGL (*Acute Exposure Guideline Levels*) - Níveis de diretrizes de exposição Aguda - são estimativas de concentrações de produtos químicos perigosos em que a maioria das pessoas, incluindo indivíduos sensíveis, começará a sentir efeitos na saúde se expostos por um período específico (duração). Para cada duração de exposição, um produto químico pode ter até três valores de AEGL, cada um correspondendo a um nível específico de efeito na saúde (NOAA, 2022).

Os ERPGs (*Emergency Response Planning Guidelines*) - Diretrizes do planejamento da resposta de emergência - são diretrizes que estimam as concentrações de um produto químico perigoso no ar que podem afetar a maioria das pessoas em uma exposição de uma hora. No entanto, é importante ressaltar que pessoas sensíveis, como idosos, doentes e crianças pequenas, podem sofrer efeitos adversos mesmo em concentrações abaixo dos valores de ERPG.

Os TEELs (*Temporary Emergency Exposure Limits*) - Limites de exposição de emergência temporária - são diretrizes que estimam as concentrações de um produto químico perigoso no ar que podem afetar a maioria das pessoas em um determinado período de tempo. Eles são usados em situações semelhantes aos AEGLs e ERPGs de 60 minutos. Cada produto químico pode ter até três valores TEEL, cada um correspondendo a um nível específico de efeitos na saúde.

No Quadro 5, os valores toxicológicos para amônia e no Quadro 6, os valores toxicológicos para o cloro. Portanto, resume os diferentes efeitos observados de acordo com a concentração e o tempo de exposição.

Quadro 5 - Valores toxicológicos: Amônia.

| AEGL 1 | | | | | AEGL 2 | | | | | AEGL 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 min | 30 min | 1 h | 4 h | 8 h | 10 min | 30 min | 1 h | 4 h | 8 h | 10 min | 30 min | 1 h | 4 h | 8 h |
| 30 ppm | | | | | 220 ppm | | 160 ppm | 110 ppm | 110 ppm | 2700 ppm | 1600 ppm | 1100 ppm | 550 ppm | 390 ppm |
| É a concentração acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, mas excluindo os hipersuscetíveis, pode experimentar um desconforto notável. Concentrações abaixo do AEGL 1 representam níveis de exposição que produzem leve odor, sabor ou outra irritação sensorial leve. | | | | | Concentração acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, mas excluindo os hiperssusceptíveis, pode experimentar efeitos a longo prazo sérios ou irreversíveis ou ver impedida sua capacidade para escapar. Concentrações abaixo do AEGL 2, mas acima do AEGL 1, representam níveis de exposição que podem causar um notável desconforto. | | | | | É a concentração acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, mas excluindo os hiperssusceptíveis, poderia experimentar efeitos ameaçadores para a vida ou morte. Concentrações abaixo do AEGL 3, mas acima do AEGL 2, representam níveis de exposição que podem causar efeitos a longo prazo, sérios ou irreversíveis, ou impedir a capacidade de escapar. | | | | |
| **ERPG 1** | | | | | **ERPG 2** | | | | | **ERPG 3** | | | | |
| 25 ppm (1 h) | | | | | 150 ppm (1 h) | | | | | 750 ppm (1 h) | | | | |
| É a concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos podem ser expostos por até uma hora experimentando apenas efeitos adversos leves e transitórios ou percebendo um odor claramente definido | | | | | É a concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos podem ser expostos por até uma hora sem experimentar ou desenvolver efeitos graves ou irreversíveis, ou sintomas que possam impedir a possibilidade de realizar ações de proteção. | | | | | É a concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos podem ser expostos por até uma hora sem experimentar ou desenvolver efeitos que ameacem suas vidas. No entanto, eles ainda podem sofrer efeitos graves ou irreversíveis e sintomas que possam impedir a possibilidade de realizar ações de proteção. | | | | |
| **TEEL 1** | | | | | **TEEL 2** | | | | | **TEEL 3** | | | | |
| 20,9 mg/m$^3$ | | | | | 11 mg/m$^3$ | | | | | 766 mg/m$^3$ | | | | |
| Concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos experimentariam efeitos leves e transitórios sobre a saúde ou perceberiam claramente um odor definido. | | | | | Concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos poderiam ser expostos sem experimentar ou desenvolver efeitos sérios ou irreversíveis sobre a saúde, ou sintomas que poderiam impedir a possibilidade de realizar ações de proteção. | | | | | Concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos poderiam estar expostos sem experimentar ou desenvolver efeitos ameaçadores à vida. No entanto, eles podem sofrer efeitos sérios ou irreversíveis e sintomas que impediriam a possibilidade de realizar ações de proteção | | | | |

Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

Quadro 6 - Valores toxicológicos: Cloro.

| AEGL 1 | | | | | AEGL 2 | | | | | AEGL 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 min | 30 min | 1 h | 4 h | 8 h | 10 min | 30 min | 1 h | 4 h | 8 h | 10 min | 30 min | 1 h | 4 h | 8 h |
| 0,5 ppm | | | | | 2,8 ppm | | 2 ppm | 1 ppm | 0,7 ppm | 50 ppm | 28 ppm | 20 ppm | 10 ppm | 7,1 ppm |
| Concentração acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, mas excluindo os hiperssusceptíveis, possa experimentar um desconforto notável. Concentrações abaixo do AEGL 1 representam níveis de exposição que produzem um odor leve, sabor ou outra irritação sensorial leve. | | | | | Concentração acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, mas excluindo os hiperssusceptíveis, pode experimentar efeitos a longo prazo sérios ou irreversíveis ou ver impedida sua capacidade para escapar. Concentrações abaixo do AEGL 2, mas acima do AEGL 1, representam níveis de exposição que podem causar um notável desconforto. | | | | | É a concentração acima da qual se prevê que a população em geral, incluindo indivíduos suscetíveis, mas excluindo os hiperssusceptíveis, poderia experimentar efeitos ameaçadores para a vida ou morte. Concentrações abaixo do AEGL 3, mas acima do AEGL 2, representam níveis de exposição que podem causar efeitos a longo prazo, sérios ou irreversíveis, ou impedir a capacidade de escapar. | | | | |
| **ERPG 1** | | | | | **ERPG 2** | | | | | **ERPG 3** | | | | |
| 1 ppm (1 h) | | | | | 3 ppm (1 h) | | | | | 20 ppm (1 h) | | | | |
| É a concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos podem ser expostos por até uma hora experimentando apenas efeitos adversos leves e transitórios ou percebendo um odor claramente definido | | | | | É a concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos podem ser expostos por até uma hora sem experimentar ou desenvolver efeitos graves ou irreversíveis, ou sintomas que possam impedir a possibilidade de realizar ações de proteção. | | | | | É a concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos podem ser expostos por até uma hora sem experimentar ou desenvolver efeitos que ameacem suas vidas. No entanto, eles ainda podem sofrer efeitos graves ou irreversíveis e sintomas que possam impedir a possibilidade de realizar ações de proteção. | | | | |
| **TEEL 1** | | | | | **TEEL 2** | | | | | **TEEL 3** | | | | |
| 1,45 mg/m$^3$ | | | | | 6 mg/m$^3$ | | | | | 58 mg/m$^3$ | | | | |
| Concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos experimentariam efeitos leves e transitórios sobre a saúde ou perceberiam claramente um odor definido. | | | | | Concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos poderiam ser expostos sem experimentar ou desenvolver efeitos sérios ou irreversíveis sobre a saúde, ou sintomas que poderiam impedir a possibilidade de realizar ações de proteção. | | | | | Concentração máxima no ar abaixo da qual se acredita que quase todos os indivíduos poderiam estar expostos sem experimentar ou desenvolver efeitos ameaçadores à vida. No entanto, eles podem sofrer efeitos sérios ou irreversíveis e sintomas que impediriam a possibilidade de realizar ações de proteção | | | | |

Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

O IDLH (*Immediately dangerous to life or health*) ou IPVS (Imediatamente perigoso para vida ou saúde) - são limites de exposição no local de trabalho que tem como objetivo proteger os trabalhadores contra a exposição a produtos químicos tóxicos durante o trabalho. Os limites de IDLH são derivados pelo Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH) com base em dados em animais e humanos.

Dois fatores são considerados ao estabelecer limites IDLH. Os trabalhadores devem poder escapar do ambiente onde estão expostos a produtos químicos perigosos sem sofrer (a) danos permanentes à saúde ou (b) irritação severa dos olhos ou do trato respiratório (ou outras condições) que possam prejudicar sua capacidade de fuga (NOAA, 2022).

Se for feita uma comparação entre os valores de IPVS-IDLH (Figura 25) de algumas substâncias tóxicas, observa-se que a amônia apresenta um dos valores mais altos, embora muito distante do valor de monóxido de carbono; o cloro é 10 vezes mais tóxico que a amônia e quase 10 vezes menos que a fosfina. Deve-se levar em conta que quanto menor o valor de toxicidade da substância, mais perigosa é (POMARES *et al*., 2019).

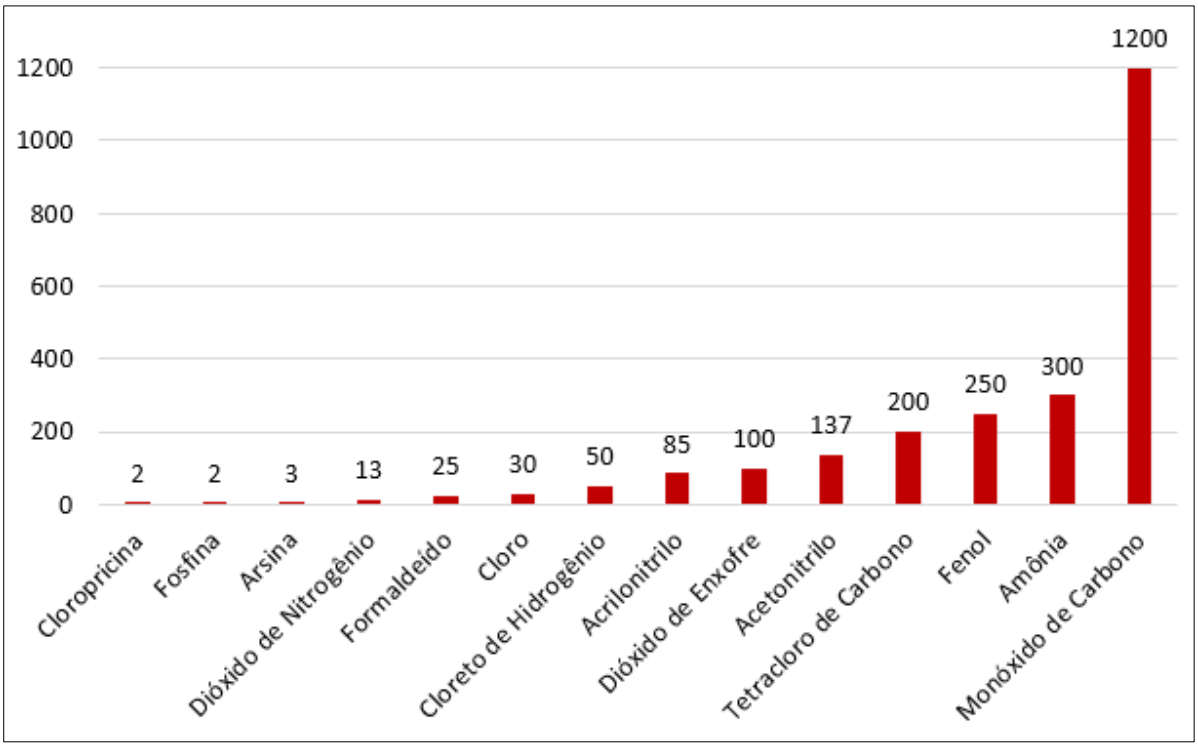


Figura 25 - Valores de IPVS – IDLH (ppm).
Fonte: *Guía Operativa – Actuaciones con cloro para bomberos V1 – 2019.*

# 5. IDENTIFICAÇÃO DE PRODUTOS PERIGOSOS NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO

Embora o termo "Produto Perigoso" seja genérico, no contexto das atividades de transporte terrestre, incluindo o rodoviário e ferroviário, são considerados Produtos Perigosos aqueles que foram classificados pela Organização das Nações Unidas (ONU) e publicados no *UN Transport of Dangerous Goods* (*the Orange Book*), também conhecido como o Livro Laranja. Esse livro é um modelo de regulamentação que estabelece recomendações para o transporte seguro desses produtos (TEIXEIRA, 2010).

Outro fator importante é a confusão entre carga perigosa e produto perigoso. Carga perigosa consiste no transporte inadequado de uma carga, apresentando risco ao trânsito e pedestres (CBM/RS, 2023).

Já os agentes químicos que sejam perigosos, por representarem risco para a saúde de pessoas, para a segurança pública ou para o meio ambiente, são submetidos às regras e aos procedimentos estabelecidos pelo Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos, Resolução ANTT nº. 3665/11 (CBM/RS, 2023).

A identificação de produtos perigosos é fundamental para a segurança do transporte rodoviário. A classificação é feita por meio de especificações técnicas, através de leis e regulamentações específicas dos órgãos competentes, que levam em consideração as características químicas e físicas do produto transportado, bem como os riscos associados ao seu manuseio, transporte e armazenamento. Dessa forma, é possível garantir que o produto seja transportado de forma segura e eficiente, minimizando os riscos para o meio ambiente e para a saúde pública.

Conforme a ONU, para o transporte de produtos perigosos e o tipo de risco que estes apresentam é feita a classificação. São 9 classes de materiais que podem ou não ser subdivididas conforme o Quadro 7.

A amônia e o cloro pertencem à classe de risco 2 (gases), subclasse de risco 2.3 (gases tóxicos), ou seja, gás tóxico por inalação.

Quadro 7 - Denominação de classes e subclasses de risco de produtos perigosos.

| Classificação | Subclasse | Definições |
|---|---|---|
| **Classe 1 - Explosivos** | 1.1 | Substâncias e artigos com risco de explosão em massa. |
| | 1.2 | Substância e artigos com risco de projeção, mas sem risco de explosão em massa. |
| | 1.3 | Substâncias e artigos com risco de fogo e com pequeno risco de explosão ou de projeção, ou ambos, mas sem risco de explosão em massa. |
| | 1.4 | Substância e artigos que não apresentam risco significativo. |
| | 1.5 | Substâncias muito insensíveis, sem risco de explosão em massa. |
| | 1.6 | Artigos extremamente insensíveis, sem risco de explosão em massa. |
| **Classe 2 - Gases** | 2.1 | Gases Inflamáveis: são gases que a 20°C e à pressão normal são inflamáveis. |
| | 2.2 | Gases não-inflamáveis, não tóxicos: são gases asfixiantes e oxidantes, que não se enquadrem em outra subclasse. |
| | 2.3 | Gases Tóxicos: são gases tóxicos e corrosivos que constituam risco à saúde das pessoas. |
| **Classe 3 - Líquidos Inflamáveis** | - | Líquidos Inflamáveis: são líquidos, misturas de líquidos ou líquidos que contenham sólidos em solução ou suspensão, que produzam vapor inflamável a temperaturas de até 60,5°C. |
| **Classe 4 - Sólidos Inflamáveis** | 4.1 | Sólidos Inflamáveis, substâncias auto reagentes e explosivos sólidos insensibilizados: sólidos que, em condições de transporte, sejam facilmente combustíveis, ou que, por atrito, possam causar fogo ou contribuir para tal. |
| | 4.2 | Substâncias sujeitas a combustão espontânea: substâncias sujeitas a aquecimento espontâneo em condições normais de transporte, ou a aquecimento em contato com o ar, podendo inflamar-se. |
| | 4.3 | Substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis: substâncias que por interação com água, podem tornar-se espontaneamente inflamáveis, ou liberar gases inflamáveis em quantidades perigosas. |
| **Classe 5 - Substâncias Oxidantes e** | 5.1 | Substâncias Oxidantes: são substancias que podem causar a combustão de outros materiais ou contribuir para isso. |

| | | |
|---|---|---|
| **Peróxidos Orgânicos** | 5.2 | Peróxidos Orgânicos: são poderosos agentes oxidantes, periodicamente instáveis, podendo sofrer decomposição. |
| **Classe 6 - Substâncias Tóxicas e Substancias Infectantes** | 6.1 | Substâncias Tóxicas: são substancias capazes de provocar morte, lesões graves ou danos à saúde humana, se ingeridas ou inaladas, ou se entrarem em contato com a pele. |
| | 6.2 | Substâncias Infectantes: são substancias que podem provocar doenças infecciosas em seres humanos ou em animais. |
| **Classe 7 - Material Radioativo** | - | Qualquer material ou substância que emite radiação. |
| **Classe 8 - Substâncias Corrosivas** | - | São substâncias que, por ação química, causam severos danos quando em contato com tecidos vivos. |
| **Classe 9 - Substâncias e Artigos Perigosos Diversos** | - | São aqueles que apresentam, durante o transporte, um risco abrangido por nenhuma das outras classes. |

Fonte: Resolução 5232/2016 – ANTT.

A identificação de produtos perigosos no transporte rodoviário é realizada por meio de um sistema de símbolos de risco, o painel de segurança é de cor alaranjada e tem a forma de um retângulo, contendo o número ONU (que identifica a substância) e o número de risco (que indica o tipo e o grau de perigo). Importante que os motoristas e demais envolvidos no transporte estejam familiarizados com esses símbolos (Figura 26) para garantir a segurança da operação.

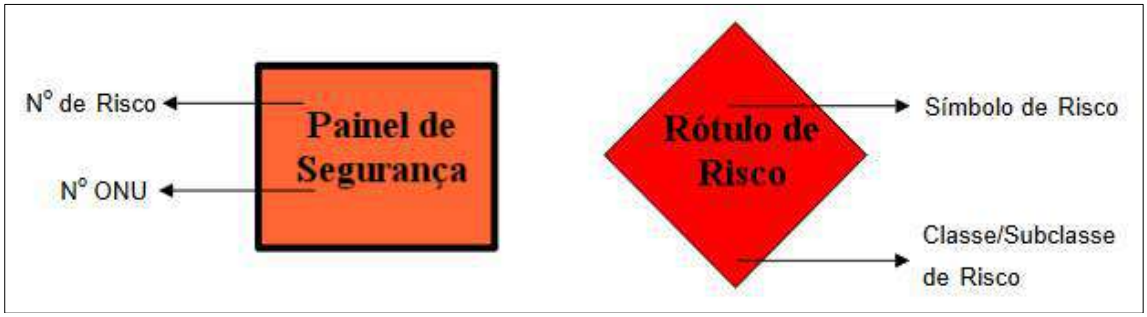


Figura 26 - Painel de Segurança e Rótulo de risco.
Fonte: ABNT - NBR 7500. Adaptado.

O número de risco é fixado na parte superior do painel de segurança e pode conter até três dígitos, indicando a natureza e intensidade do risco, conforme estipulado na Resolução nº 420 de 12 de fevereiro de 2004, do Relatório Nacional Administração de Transporte Terrestre (ANTT) / Ministério dos Transportes. O risco principal é identificado no primeiro algarismo, o segundo e terceiro algarismo representam o risco subsidiário do produto transportado.

O número ONU, é baseado em um número de quatro dígitos, que visa distinguir e indicar produtos químicos, configurando assim a institucionalização de padrões usados para caracterizar produtos perigosos em todo o mundo.

Em outras palavras, o número ONU é o RG de um produto perigoso. Normalmente, este número deve estar localizado na parte inferior do painel de segurança, conforme a Figura 27.

É importante diferenciar as diferentes formas de amônia para garantir o transporte adequado e seguro de acordo com as especificações técnicas e regulamentações dos órgãos competentes.

A amônia anidra trata da amônia 100% pura, e amônia em solução é uma solução corrosiva de amônia em água que normalmente tem concentração entre 10-35%. Para o transporte de amônia anidra (N° ONU 1005), amônia em solução aquosa com teor superior a 50% de amônia (Nº ONU 3318) e amônia em solução aquosa com teor superior a 35% e máximo de 50% amônia (Nº ONU 2073), são substâncias da classe 2 (gases), enquanto a amônia em solução contendo entre 10% e 35% de amônia (Nº ONU 2672) é uma substância da classe 8 (corrosiva), (POMARES *et al*., 2019).

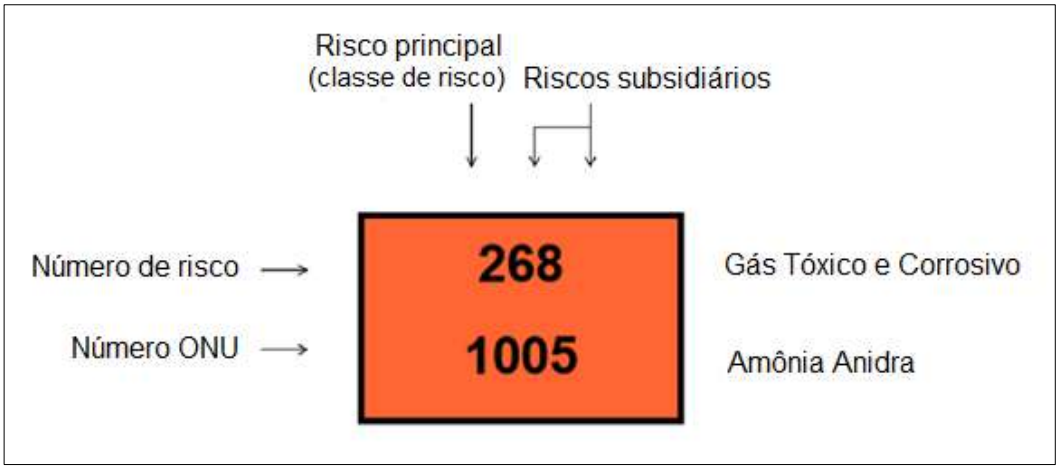


Figura 27 - Painel de Segurança.
Fonte: ABNT - NBR 7500. Adaptado.

Já o cloro (Nº ONU 1017), também pertence a classe 2 (gases), número de risco (268), ou seja, tóxico e corrosivo (FISPQ, 2019).

Os Rótulos de Risco têm a forma de um losango, seu perímetro rodeado por borda de linha contínua ou pontilhada, contém símbolos, cor de fundo, figuras e/ou expressões emolduradas, número de classe ou subclasse e/ou texto de identificação do risco, referentes à classe/subclasse do produto perigoso. A amônia e o cloro possuem o número de risco 268, 2 (gás), 6 (tóxico), 8 (corrosivo), conforme a Figura 28.

Figura 28 - Ilustração do Rótulo de Risco.
Fonte: ABNT - NBR 7500. Adaptado.

Substâncias perigosas para o meio ambiente devem exibir o símbolo indicado na Figura 29, é um losango com uma árvore e um peixe sobre um fundo branco. O objetivo é alertar sobre a possibilidade de danos ambientais em caso de acidente ou vazamento da substância transportada.

Figura 29 - Simbologia Riscos ao Meio Ambiente.
Fonte: ABNT - NBR 7500. Adaptado.

Deve ser fixada no veículo que transporta a substância: na traseira (painel de segurança, do lado esquerdo do motorista), nas laterais (painel de segurança e o rótulo indicativo da classe ou subclasse de risco) e na frente (painel de segurança, do lado esquerdo do motorista), e empregues em local visível, conforme a Figura 30.

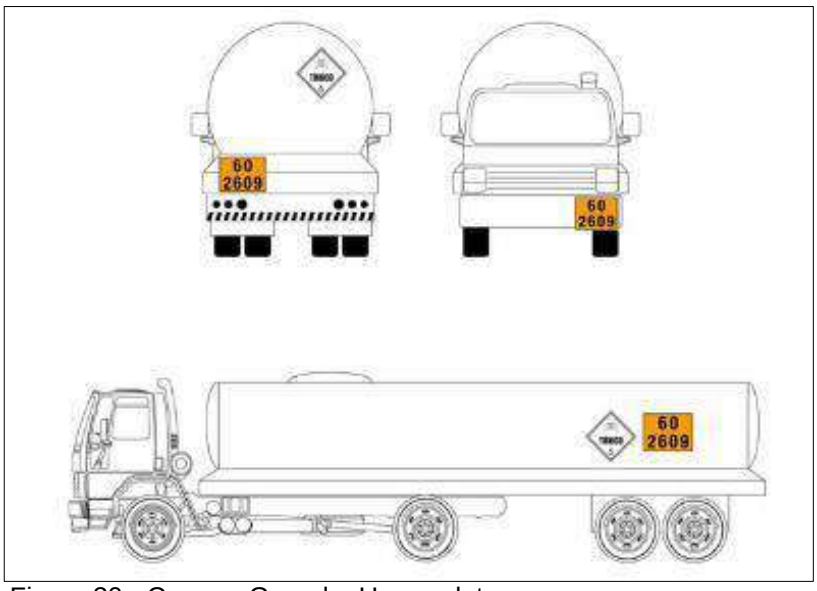


Figura 30 - Carga a Granel – Um produto.
Fonte: ABNT - NBR 7500. Adaptado.

## 5.1 Sequência operacional de acidentes

De acordo com o Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás (CBM/GO) a sequência operacional de acidentes envolvendo Produtos Perigosos no transporte terrestre, segue a seguinte ordem de prioridade:

1) Identificação;
2) Isolamento;
3) Salvamento;
4) Contenção/confinamento;
5) Descontaminação.

Os órgãos e empresas têm atribuições específicas pertinentes à sua responsabilidade e jurisdição conforme o Quadro 8. O Corpo de Bombeiro Militar é o único órgão responsável por todas as etapas de atendimento, além de ser o único responsável diretamente pelas ações de salvamento e resgate de vítimas (CBM/GO, 2017).

Quadro 8 - Quadro de definição de atribuições legais.

| Órgãos / Atividades | Corpo de Bombeiros Militar | Polícia Militar | Polícia Rodoviária | Guarda Municipal – Trânsito | Órgão Ambiental | ABIQUIM | CNEN | Aterro Sanitário – Prefeitura | Transportador |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Identificação | Sim | Não | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Não | Sim |
| Isolamento | Sim | Sim | Sim | Sim | Não | Não | Não | Não | Sim |
| Salvamento | Sim | Não | Não | Não | Não | Não | Não | Não | Não |
| Contenção | Sim | Não | Não | Não | Sim | Não | Sim | Sim | Sim |
| Descontaminação | Sim | Não | Não | Não | Sim | Não | Sim | Não | Sim |
| Zona Quente/Exclusão | Sim | Não | Não | Não | Não | Não | Sim | Não | Não |
| Zona Morna/Redução de contaminação | Sim | Não | Não | Não | Não | Não | Sim | Não | Não |
| Zona Fria/Apoio | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim |

Fonte: Manual Operacional de Bombeiros: Produtos Perigosos, CBM/GO 2017.

## 5.2 Zonas de segurança

Zonas de segurança são áreas delimitadas em torno de um incidente com produtos perigosos, onde são estabelecidas medidas de proteção para as pessoas e o meio ambiente.

A definição das zonas de segurança leva em consideração o tipo e a quantidade de substâncias envolvidas no incidente, o grau de risco, a topografia do local, condições meteorológicas, população local, direção e velocidade dos ventos, lençol freático, recursos hídricos, além do tempo previsto de trabalho entre outros fatores.

As zonas de segurança são divididas em zona quente, morna e fria (Figura 31) que correspondem a diferentes níveis de risco e controle de acesso. As zonas de segurança são estabelecidas para proteger as equipes de resposta a emergências e outros trabalhadores envolvidos na operação, bem como o público em geral (CBM/GO, 2017).

.

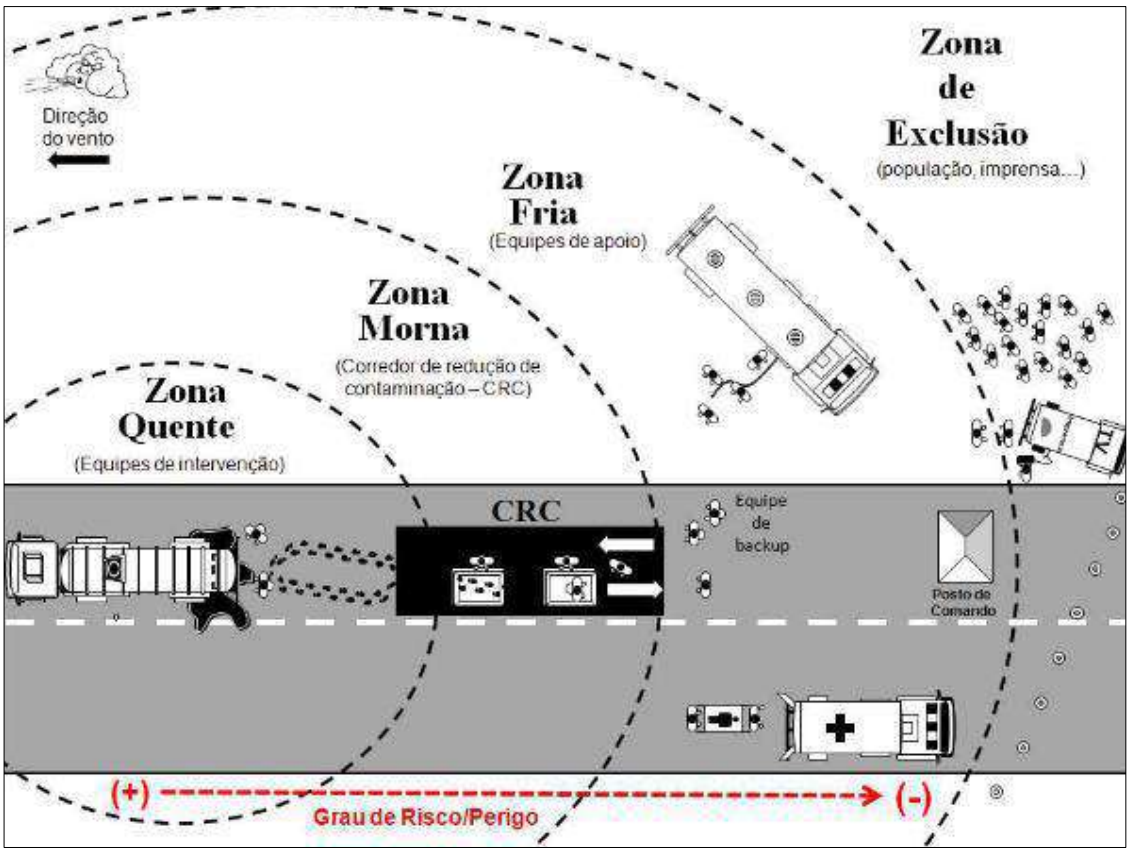


Figura 31 - Classificação de Zonas de Segurança.
Fonte: *Emergency Response Training Center, Hazardous Material Cource, USA, 2010.*

A *Emergency Response Training Center, Hazardous Material Course*, USA, em 2010, propôs a seguinte classificação de zonas de segurança para situações de emergência envolvendo Produtos Perigosos:

A zona quente é a área imediatamente circunvizinha à ocorrência, que se estende até um limite tal que seja capaz de prevenir os efeitos dos agentes agressivos às pessoas fora desta área. O acesso ao interior desta área só deve ser permitido a profissionais capacitados e adequadamente protegidos, os quais irão realizar o controle da emergência de maneira ofensiva. Deve ser implementado um sistema de controle crítico, de forma a controlar o acesso e a permanência dos profissionais nesta área (ROCHA, 2015).

Na zona morna ou zona de redução de contaminação, é a área que circula toda a área quente. É instalado o cordão de isolamento. É uma área de risco, onde apenas membros da equipe de emergência podem ter acesso. Nesta área estarão locados os equipamentos e respondedores para a descontaminação e todo suporte da zona quente. Deve-se estabelecer nessa área um corredor de descontaminação. O Corredor controla o acesso da Zona Quente e determina uma área específica para as

atividades de descontaminação, ninguém no corredor de descontaminação deverá estar vestindo com um nível de proteção inferior ao determinado para a equipe de descontaminação (ROCHA, 2015).

Na área denominada de zona fria ou zona de suporte, o risco será mínimo ou inexistente é onde estará instalado o Posto de Comando (PC), como também todos os suportes necessários para o controle do incidente. Nesta área estarão os equipamentos de apoio, laboratórios de campo, imprensa e apoio médico.

Na Zona de Observação ou Zona de Exclusão é a área externa à Zona Fria, onde o pessoal de segurança e o público em geral são mantidos a uma distância segura para observação e monitoramento da situação.

**Isolamento**

O objetivo é apoiar na segurança dos respondedores, das vítimas, do patrimônio e do meio ambiente. No isolamento alguns fatores irão influenciar o tamanho do raio de isolamento, como: se for dia ou noite, grandes derramamentos, se há incêndio, se o produto pode reagir com a água e liberar vapores tóxico, condições meteorológicas, direção do vento, topografia, reatividade entre substâncias químicas compatíveis ou não (CBM/GO, 2017).

O isolamento será realizado conforme a Figura 32 e as distâncias conforme o Quadro 9 do manual para atendimento a emergências com produtos perigosos da ABIQUIM.

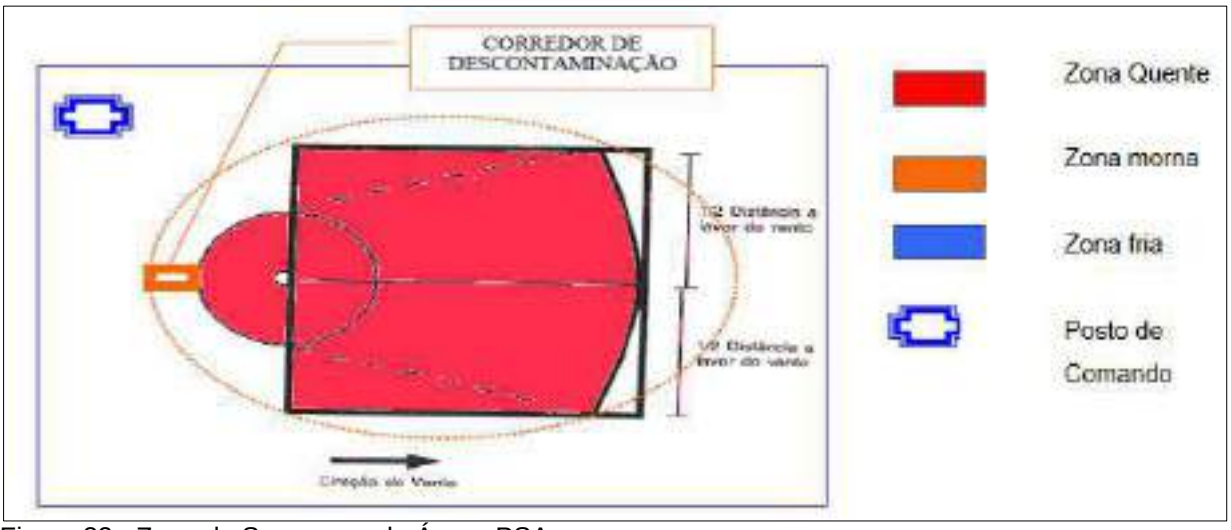


Figura 32 - Zona de Segurança de Área - PSA.
Fonte: ABIQUIM, 2015.

Quadro 9 - Distâncias de isolamento inicial e de ação protetora.

| ONU | NOME DO PRODUTO | **Grandes Derramamentos** Provenientes de um tanque grande ou de diversas embalagens pequenas | | | **Pequenos Derramamentos** Provenientes de embalagens pequenas ou um pequeno vazamento de um tanque grande | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Primeiro, ISOLE em todas as direções | A seguir, PROTEJA as pessoas no sentido do vento | | Primeiro, ISOLE em todas as direções | A seguir, PROTEJA as pessoas no sentido do vento | |
| | | | **DIA** | **NOITE** | | **DIA** | **NOITE** |
| **1005** | **Amônia anidra** | **150 m** | **800 m** | **2,0 km** | **30 m** | **100 m** | **200 m** |
| 1008 | Trifluoreto de boro | 300 m | 1,7km | 4,8 km | 30 m | 100 m | 500 m |
| 1016 | Monóxido de carbono | 200 m | 1,2 km | 4,8 km | 30 m | 100 m | 200 m |
| **1017** | **Cloro** | **500 m** | **3,0 km** | **7,9 km** | **60 m** | **400 m** | **1,5 km** |
| 1023 | Gás de carvão | 100 m | 400 m | 500 m | 60 m | 200 m | 200 m |
| 1026 | Cianogênio | 60 m | 400 m | 1,7 km | 30 m | 100 m | 500 m |
| 1040 | Oxido de etileno | 150m | 900 m | 2,0 km | 30 m | 100 m | 200 m |
| 1040 | Oxido de etileno com nitrogênio | 150 m | 900 m | 2,0 km | 30 m | 100 m | 200 m |
| 1040 | Epoxietano | 150 m | 900 m | 2,0 km | 30 m | 100 m | 200 m |
| 1040 | Oxirano | 150 m | 900 m | 2.0 km | 30 m | 100 m | 200 m |
| 1045 | Flúor, comprimido | 100 m | 500 m | 2,3 km | 30 m | 100 m | 200 m |
| 1048 | Brometo de hidrogênio, anidro | 200 m | 1,2 km | 3,9 km | 30 m | 100 m | 300 m |
| 1050 | Cloreto de hidrogênio | 60 m | 300 m | 1,3 km | 30 m | 100 m | 300 m |
| 1050 | Ácido clorídrico | 60 m | 300 m | 1,3 km | 30 m | 100 m | 300 m |
| 1051 | Cianeto de hidrogênio | 1000 m | 3,7 km | 8,4 km | 60 m | 300 m | 1 km |
| 1052 | Sulfeto de hidrogênio, anidro | 300 m | 1,5 km | 3,2 km | 30 m | 100 m | 500 m |
| 1053 | Sulfeto de hidrogênio | 300 m | 1,7 km | 5,6 km | 30 m | 100 m | 400 m |
| 1062 | Brometo de metila | 100 m | 600 m | 1,9 km | 30 m | 100 m | 200 m |

Fonte: Manual para atendimento a emergências com produtos perigosos - ABIQUIM.

# 6. ANÁLISE DE ACIDENTES ENVOLVENDO PRODUTOS PERIGOSOS

## 6.1 Classe de risco e locais de ocorrência de acidentes

A Organização das Nações Unidas (ONU), adotou critérios técnicos para a classificação dos produtos perigosos, conforme suas propriedades físico-químicas e toxicológicas, como por exemplo: temperatura, pressão, toxicidade, corrosividade, radioatividade, inflamabilidade, potencial de oxidação, explosividade, reação espontânea, polimerização, decomposição, infectantes, entre outras.

De acordo com o Relatório de Acidentes Ambientais do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), referente ao período de 2006 a 2010, os líquidos inflamáveis (classe 3) foram responsáveis pelo maior número de ocorrências (Figura 33), com 561 casos (representando 29,5% do total de acidentes). Em seguida, as classes com maior incidência foram gases (classe 2), com 151 acidentes, e substâncias corrosivas (classe 8), com 100 ocorrências durante o período analisado. Esse padrão se manteve consistente quando observamos cada ano de estudo (IBAMA, 2010).

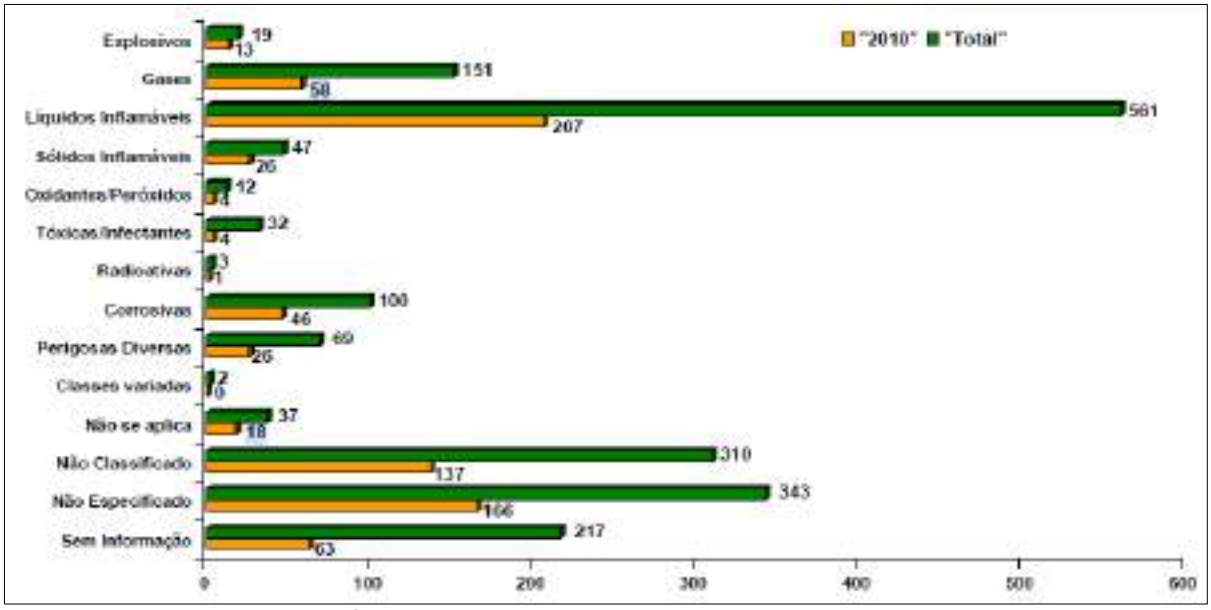


Figura 33 - Comparativo do número de acidentes registrados pelo IBAMA por classe de risco no ano de 2010, e o consolidado (total) de acidentes ocorridos nos anos de 2006 a 2010.
Fonte: IBAMA, 2010. Relatório de acidentes ambientais.

A denominação “não se aplica” refere-se as ocorrências em que não há envolvimento de produtos químicos, porém são danosos ao meio ambiente. Durante esse período, 11,4% dos registros de acidentes foram classificados como "sem informação" em relação ao produto envolvido, o que totalizou 217 acidentes. Além disso, 16,3% dos acidentes registrados (310 incidentes) foram classificados como "não classificados", o que significa que os produtos envolvidos não se enquadram em nenhuma classe de risco específica (IBAMA, 2010).

Em todas as fases do uso de insumos químicos, pode haver a possibilidade de acidentes. No entanto, as etapas mais propensas a acidentes são aquelas relacionadas ao transporte dessas substâncias, independentemente do modal utilizado (rodoviário, ferroviário, marítimo, aquaviário ou por dutos). Essas operações são vulneráveis a várias situações de risco, que podem resultar em acidentes desde a origem até o destino final da carga (TEIXEIRA, 2004).

De acordo com informações divulgadas pela Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT), no Brasil, a maior parte da produção é movimentada através do modal rodoviário, que representa 60,48% do transporte de cargas no país (ANTT, 2006).

Em resumo, o sistema de logística brasileiro para o escoamento da produção depende principalmente do modal rodoviário, devido à falta de investimentos, manutenção e expansão de outras malhas de transporte. Essa situação tem levado a uma concentração excessiva de recursos na matriz rodoviária.

Nos estados de São Paulo e Minas Gerais, que apresentam a maior malha viária do país há uma maior predominância de acidentes. Ainda segundo o IBAMA, os locais de ocorrência dos acidentes ambientais, em rodovias apresentam maior percentual, com 33% do total de ocorrências (Figura 34, Tabela 7).

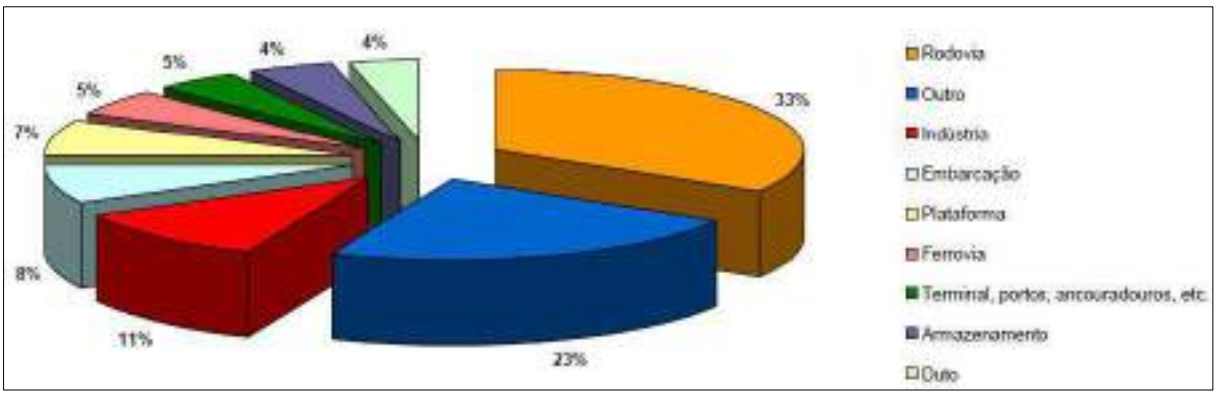


Figura 34 - Percentual de acidentes por local, referente aos anos de 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010.
Fonte: IBAMA, 2010. Relatório de acidentes ambientais.

Tabela 7 - Número de acidentes ambientais por local, no ano de 2010 e consolidado de 2006 a 2010.

| Local | Número de acidentes 2010 | Número de acidentes 2006 a 2010 |
|---|---|---|
| Rodovia | 254 | 636 |
| Outros | 133 | 336 |
| Industria | 92 | 206 |
| Embarcação | 39 | 147 |
| Plataforma | 74 | 135 |
| Ferrovia | 19 | 99 |
| Terminais, portos, ancoradouros | 27 | 86 |
| Armazenamento | 39 | 83 |
| Duto | 43 | 70 |
| Posto de combustível | 21 | 40 |
| Barragem | 12 | 37 |
| Refinaria | 3 | 8 |

Fonte: IBAMA, Relatório de Acidentes Ambientais (2010).

No estado do Rio Grande do Sul a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), é responsável por lidar com situações de emergência que envolvam danos ambientais Essas emergências podem incluir: emergências químicas, nos acidentes rodoviários, ferroviários ou hidroviários, que envolvem o transporte de produtos e/ou resíduos perigosos, acidentes em indústrias, mortandade de peixes e demais situações que se caracterizam como acidentes e que que possam colocar em risco a população ou o meio ambiente (FEPAM, 2019).

As situações emergenciais atendidas pela FEPAM são classificadas de acordo com o tipo de acidente, produto ou decorrência, sendo assim, durantes os anos de 2004 à 2019, as emergências atendidas variam de proporção (Figura 35).

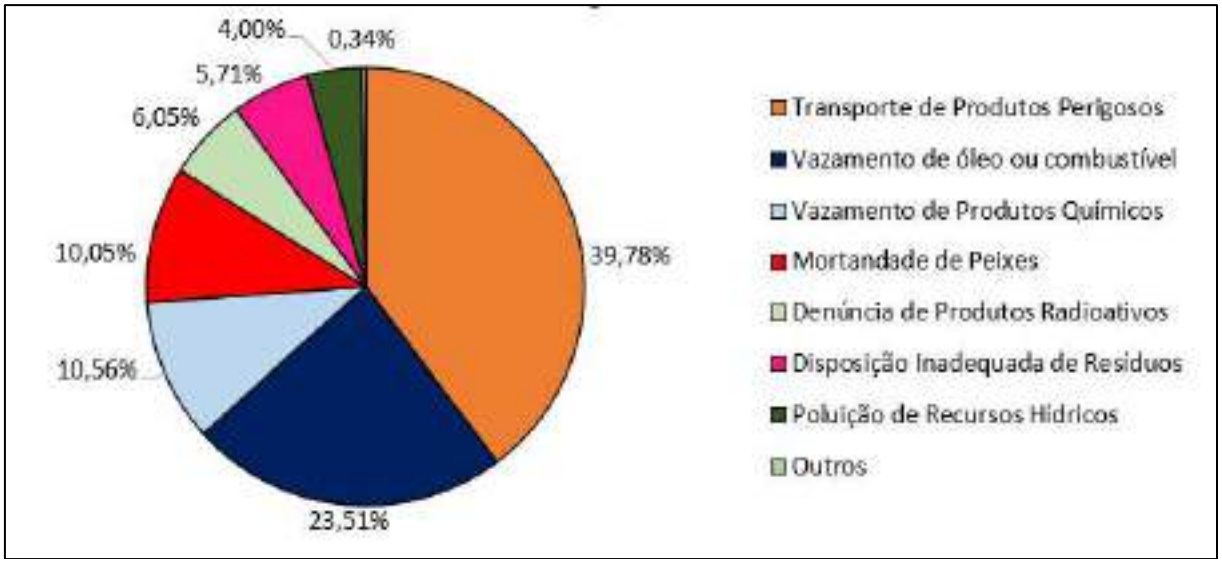


Figura 35 - Tipos de Emergências no Rio Grande do Sul, 2004-2019.
Fonte: FEPAM, relatório 2019.

O maior número de atendimentos de emergência está relacionado a acidentes envolvendo transporte de produtos perigosos, representando 39,85% dos casos e totalizando 467 emergências. Além disso, as emergências classificadas como "outros" também apresentam um número significativo, respondendo por 23,55% dos atendimentos, ou seja, 276 situações. Em contrapartida, as denúncias envolvendo produtos radioativos são as menos frequentes, representando apenas 0,34% dos atendimentos no período de 2004 a 2019, o que totaliza somente 4 ocorrências (FEPAM, 2019).

## 6.2 Análise histórica de acidentes

A falta de prevenção e precaução é a causa raiz da maioria dos grandes acidentes envolvendo substâncias químicas. Infelizmente, a história tem nos mostrado que tragédias como a de *Bhopal*, na Índia (1984) poderiam ter sido evitadas se medidas preventivas adequadas tivessem sido implementadas.

A fábrica produzia pesticidas e teve uma fuga de gás tóxico. Estima-se que entre 500 mil e 600 mil pessoas foram expostas ao gás. O acidente resultou em um grande número de mortes, estimado entre 15.000 e 20.000 pessoas. Além disso, muitos sobreviventes sofreram efeitos adversos à saúde a longo prazo.

Esses acidentes trágicos servem como alerta para a importância da adoção de práticas de segurança rigorosas na manipulação, armazenamento e transporte de substâncias químicas, a fim de garantir a proteção da saúde humana e do meio ambiente (TEIXEIRA, 2010).

Serão apresentados alguns casos de acidentes que resultaram na emissão significativa de substâncias que possuem um comportamento semelhante e que são lançados para a atmosfera.

**Explosão fábrica de amônia em Toulouse, França (2001)**

Quantidade: 300 toneladas de amônia.

Causa: No dia do acidente, um vazamento de amônia na fábrica causou uma nuvem tóxica que se acumulou no subsolo da instalação. Posteriormente, uma faísca originada de uma fonte ainda desconhecida provocou uma explosão maciça. O impacto foi devastador, resultando na destruição de várias estruturas e afetando severamente a área circundante. A explosão, equivalente a um tremor de magnitude

3,4 graus na escala de Richter (que vai até 9), foi registrada em vários sismógrafos da rede francesa.

Resultado: deixou 31 mortos e 2.500 feridos. A explosão causou danos em 35 mil residências, devastando não apenas as instalações dessa empresa que produzia fertilizantes como outros prédios na mesma região, como um hospital psiquiátrico, a Escola de Química de Toulouse e uma escola de ensino médio.

Esta notícia encontra-se, disponível em https://www.rfi.fr/br/

**Explosão de gás cloro no porto de Aqaba, na Jordânia (2022)**

Quantidade: 25 toneladas de cloro.

Causa: Um cabo que levantava um tanque de 25 toneladas se rompeu, derrubando um container com cloro, um gás tóxico nocivo ao ser humano. A explosão do contêiner formou uma grande nuvem amarela

Resultado: Treze pessoas morreram e mais de 250 ficaram feridas

Esta notícia encontra-se, disponível em https://oglobo.globo.com

**Caminhão que tombou com produto químico causa bloqueio na BR-392, entre Pelotas e Rio Grande.**

Quantidade: 18 toneladas de cloro em gás.

Causa: o condutor relatou que perdeu o controle, mas não soube apontar o motivo aos agentes.

Resultado: A BR-392 entre Pelotas e Rio Grande ficou totalmente bloqueada para retirada do caminhão e o isolamento total da área, a partir da ponte do Canal do São Gonçalo até a Unidade Operacional da PRF na balança.

Esta notícia encontra-se, disponível em https://gauchazh.clicrbs.com.br

Os exemplos citados são apenas uma pequena amostra dos possíveis acidentes envolvendo produtos perigosos. Portanto, é extremamente importante que as empresas como às transportadoras e a todas as organizações públicas e privadas, que de alguma forma estão ligadas à segurança do trânsito nas rodovias, adotem medidas rigorosas de segurança.

Devem possuir um efetivo programa de segurança baseado nas operações, incluindo exames médicos específicos, equipamentos de proteção individual

apropriados aos riscos, protocolos ou procedimentos operacionais padronizados e um eficaz e ativo programa de treinamento para atendimento a emergências químicas.

Não se deve esperar “risco zero” de qualquer processo que envolva produtos perigosos bem como atendimento a emergências, por isso a real importância de trabalharmos a “prevenção”, pois sabemos que onde a prevenção falha é que o sinistro surge, por isso também se faz necessário a montagem e implantação de planos de emergências bem elaborados, devem incluir procedimentos claros para evacuação, comunicação interna e externa, resposta a incidentes, mobilização de recursos e coordenação com as autoridades competentes, que garantam que o atendimento a possíveis emergências sejam o mais rápido e eficaz possível, com vistas a minimização dos impactos e consequências.

É fundamental ter ferramentas que forneçam respostas rápidas e fidedignas para lidar com a situação, facilitando a tomada de decisões em tempo real. Isso contribuirá para a redução de riscos, danos ambientais e impactos negativos nas operações. Os softwares podem incluir sistemas de monitoramento, simulação, análise de dados, comunicação e gestão de informações relevantes.

Ademais, é essencial que cumpram as regulamentações e normas de segurança estabelecidas pelas autoridades competentes, a fim de minimizar os riscos associados à manipulação e ao transporte de produtos perigosos.

# 7. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para avaliar a dispersão atmosférica de gases densos decorrentes de liberações acidentais no transporte rodoviário com produtos perigosos é dividida em três cenários distintos, sendo que cada um possui um objetivo específico na análise da dispersão atmosférica.

**Cenário 1:** Manual ALOHA - Cloro ($Cl_2$): o objetivo é validar a técnica utilizada nos demais casos, como os fenômenos físico-químicos que ocorrem na liberação do gás para a atmosfera.

**Cenário 2:** Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$): o objetivo é modelar casos envolvendo o dimensionamento, a localização do orifício de vazamento na cisterna do caminhão-tanque e a forma de dispersão para a atmosfera;

**Cenário 3:** ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$): objetivo é demonstrar o comportamento da pluma conforme a classe atmosférica. A classe é determinada através da análise da velocidade do vento, insolação solar, nebulosidade e período do dia.

## 7.1 Cenário 1: Manual ALOHA - Cloro ($Cl_2$)

O manual do ALOHA contém três exemplos detalhados de cenários fictícios, a fim de provar a técnica utilizada nos demais cenários, como os fenômenos físico-químicos que ocorrem na liberação para a atmosfera. Será representado o exemplo 3 do documento técnico. Importante salientar que as unidades não serão do Sistema Internacional de Unidades (SI), e sim no Sistema de Unidades Americanas (ou Sistema de Unidades Imperiais) assim como consta no manual.

O acidente ocorreu às 15h do dia 4 de junho de 2016, um trem que viajava na *Southern Railway* perto de *Manassas*, Virgínia, colide com um caminhão parado na *Lee Highway* (US Route 29) (Latitude: 38º46’48.44” N e Longitude 77º40’31.98” W). Três cilindros de cloro de 150 libras que estavam na carroceria do caminhão são danificados durante a colisão e simultaneamente liberam seu conteúdo. No momento do lançamento, os ventos eram de leste a cerca de 6 milhas por hora, medidos a uma altura de 3 metros. Um terço do céu está coberto por nuvens, a umidade é de cerca de 80% e a temperatura do ar é de 72°F e não há inversão de baixo nível.

Este é um lançamento de três cilindros, mas tem todas as informações necessárias no manual para modelar o lançamento com a opção *Tank source* do ALOHA. No entanto, foi modelado como uma fonte direta.

## 7.2 Cenário 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$)

Para a realização das simulações considerou-se o acidente que ocorreu no dia 14/10/2021 na BR-392 no quilômetro 54, por volta das 18h. Um caminhão carregado de cloro tombou entre os municípios de Pelotas e Rio Grande no estado do Rio Grande do Sul, entre a Praça do Pedágio do Capão Seco e a Ponte sobre o Canal São Gonçalo. O caminhão com placas do Uruguai estava se deslocando até Araranguá em Santa Catarina, com aproximadamente 18 toneladas de cloro.

A Polícia Rodoviária Federal (PRF) fez o isolamento total da área a partir da ponte do Canal São Gonçalo até a Unidade Operacional da PRF, na balança, para a retirada do caminhão. Nas simulações apresentadas neste trabalho, o vazamento no tanque do caminhão foi considerado hipotético.

Para a análise do comportamento da dispersão atmosférica, formada durante o vazamento, foram consideradas as principais propriedades químicas do gás cloro: massa específica de 3,213 kg/m³ nas condições normais de pressão e temperatura, densidade de 1,21 kg/m³ ao nível do mar a 21°C e pressão de 101,325 kPa. Consequentemente, tende a se acumular naturalmente no nível do solo, formando uma nuvem de gás visível, não é explosivo e nem inflamável (POMARES *et al*., 2019).

Foi considerado um vazamento hipotético, de que o tanque tenha o comprimento de 6,5 m e altura de 2 m e que esteja preenchido com capacidade de 85% e com um volume total de 20,4 $m^3$. A massa de líquido no interior do tanque é de 24,095 kg e está numa temperatura ambiente de 28,4°C.

As condições atmosféricas, foram obtidas através do *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referente ao dia 14/10/2021. A direção horária do vento é 241° (sudoeste) com uma velocidade de 3,7 m/s e foram medidos a uma altura de 10 m. A região ao redor do acidente é um campo aberto, o que influencia na rugosidade do terreno. A umidade relativa do ar é 63% e a temperatura do ar é de 28,4°C (INMET, 2023).

Na escolha da classe de estabilidade atmosférica, baseado na classificação de Pasquill (1961), divididas em 6 (seis) categorias, adotou-se a classe “C”. Esta classe é caracterizada por ser uma condição atmosférica neutra, que geralmente, ocorre em

dia com ventos moderados e céu parcialmente nublado. A temperatura diminui gradualmente com a altura, permitindo uma mistura vertical moderada do ar, o que favorece a dispersão de poluentes. É considerada a condição mais favorável para a dispersão de poluentes.

Diferenciar se o vazamento ocorre no topo ou no fundo do tanque está relacionado ao fato de o produto escapar na forma líquida, gasosa ou bifásica (gás e líquido), para a qual também deve ser levada em consideração a expansão volumétrica do cloro. Portanto, foi considerado 4 (quatro) casos hipotéticos (Tabela 8), sendo utilizadas as variáveis: dimensão do orifício de vazamento e a altura do orifício. A altura do orifício foi mantida a mesma em todos os casos, a saber, na parte inferior do tanque 0 m e na parte superior do tanque 2 m.

Tabela 8 - Casos analisados - Cenário 2: Acidente BR-392.

| **Variáveis** | **Casos hipotéticos** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **C1** | **C2** | **C3** | **C4** |
| Dimensão do orifício de vazamento | 1 cm | 5 cm | 10 cm | 15 cm |
| Altura do orifício de vazamento | Caso 1: 0 m<br>Caso 2: 2 m | Caso 1: 0 m<br>Caso 2: 2 m | Caso 1: 0 m<br>Caso 2: 2 m | Caso 1: 0 m<br>Caso 2: 2 m |

Fonte: do autor.

## 7.3 Cenário 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$)

O local escolhido para as simulações foi a BR-116, que é a principal via de acesso ao sul do Estado e ao Porto de Rio Grande. A escolha desta rodovia se deu pelo fato de ser um importante corredor de escoamento de produção entre o Brasil e o Mercosul.

A BR-116 cruza a Estação de Tratamento de Água Santa Bárbara (ETA Santa Bárbara), localizada na cidade de Pelotas, Latitude 31°42’56,86’ Sul e Longitude 52°22’33,60’’ Oeste. A ETA fica a 3 km do centro da cidade e possui 359 hectares de proteção e o volume de água estimado é de 10 bilhões de litros. E tem como finalidade fornecer água bruta por gravidade para a zona industrial, através de bombeamento.

Foi considerado um vazamento hipotético, que o caminhão-tanque tenha formato cilíndrico, comprimento de 6 m e altura de 2 m e que esteja preenchido com capacidade de 80% e volume de 18,8 $m^3$. A massa química no tanque é de 9,213 kg e está numa temperatura ambiente de 20°C. O orifício de vazamento ocorre na parte superior do tanque e tenha diâmetro de abertura circular de 5 centímetros.

A região ao redor do acidente é um campo aberto, o que influencia na rugosidade do terreno. A umidade relativa do ar é 75% e a temperatura do ar é de 20°C.

As dispersões de gás amônia tendem a permanecer próximo ao solo, devido a isso não foi considerado a influência de inversões térmicas.

Na escolha da classe de estabilidade atmosférica, baseado na classificação de Pasquill (1961), adotou-se para a simulação as 6 (seis) categorias atmosféricas.

Foram considerados 9 (nove) casos hipotéticos (Tabela 9), onde o vento é a média das classes de estabilidade de Pasquill (ver Tabela 4), sendo utilizadas as variáveis: classe de estabilidade atmosférica, velocidade do vento, radiação solar para a dispersão no período diurno e nebulosidade para a dispersão no período noturno. Cada cenário teve em comum os dados apresentados acima.

Tabela 9 - Casos analisados - Cenário 3: ETA Santa Bárbara.

| Classe A: extremamente instável | | Classe D: neutra | |
|---|---|---|---|
| Classe B: moderadamente instável | | Classe E: levemente instável | |
| Classe C: levemente instável | | Classe F: estável | |
| **Período Diurno** | | | |
| **Caso** | **Vento (m/s)** | **Estabilidade** | **Radiação solar** |
| 1 | 2 | A | Forte |
| 2 | 2,5 | B | Moderada |
| 3 | 4 | C | Fraca |
| 4 | 5,5 | D | Fraca |
| 5 | 6 | C | Forte |
| **Período noturno** | | | |
| **Caso** | **Vento (m/s)** | **Estabilidade** | **Nebulosidade** |
| 6 | 2,5 | F | Pouco nublado |
| 7 | 4 | E | Pouco nublado |
| 8 | 5,5 | D | Pouco nublado / nublado |
| 9 | 6 | D | Pouco nublado / nublado |
| Obs: Estabilidade D é para dia ou noite. | | | |

Fonte: do autor.

No período diurno, a atmosfera é considerada “instável”, ou relativamente turbulenta quando a energia solar aquece o ar próximo ao solo, fazendo com que o mesmo suba gerando correntes ascendentes verticais. Essas condições instáveis estão associadas com as classes de estabilidade atmosférica “A” ou “B” (EPA, 1999).

Por outro lado, no período noturno, devido à baixa radiação solar, o ar frio próximo à superfície tem menor tendência a subir acarretando menor turbulência.

Nesse caso, a atmosfera é considerada “estável” ou menos turbulenta; o vento é fraco e a classe de estabilidade é “E” ou “F” (EPA, 1999).

As classes de estabilidade “C” ou “D” representam condições de estabilidade neutra ou turbulência moderada. Condições neutras estão associadas com velocidades de vento relativamente fortes e radiação solar moderada (EPA, 1999).

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).

# 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 8.1 Cenário 1: Manual ALOHA - Cloro ($Cl_2$)

No exemplo 3 do manual do *software* ALOHA, o vazamento do cloro ($Cl_2$) ocorre em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 1 minuto e vazão média de 7.5 pounds/sec (ver Figura 36 e Anexo A). Assim como no manual, a liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 1484 jardas de comprimento (concentração ≥ 20 ppm), zona laranja de 1.9 milhas de comprimento (concentração ≥ 2 ppm) e zona amarela de 3.1 milhas de comprimento (concentração ≥ 0,5 ppm).

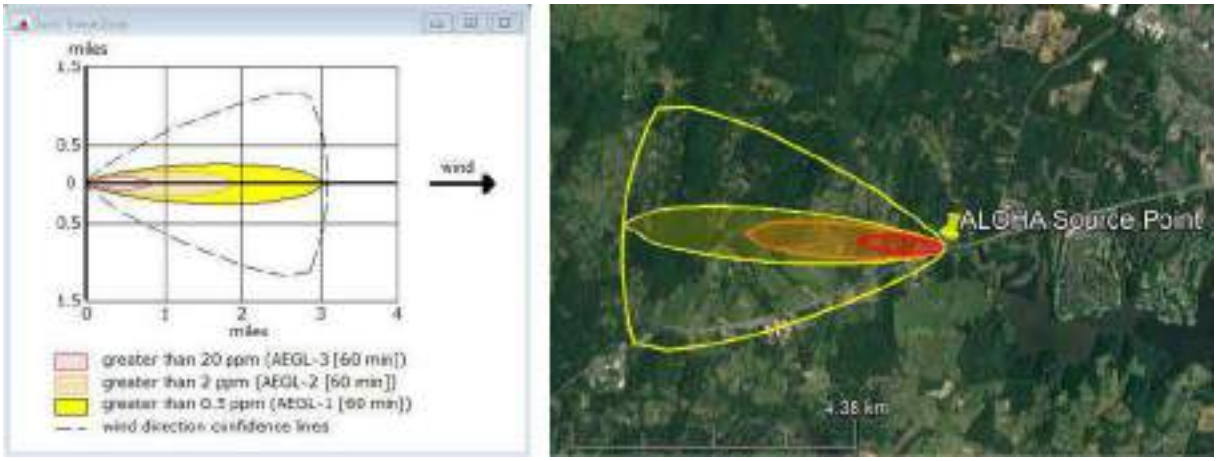


Figura 36 – Resultados simulados - Cenário 1: Manual ALOHA.
Fonte: do autor.

A Tabela 10 mostra resumidamente o alcance da nuvem conforme os níveis de concentração tóxica.

Tabela 10 - Alcance da nuvem tóxica - Cenário 1: Manual ALOHA.

| | |
|---|---|
| AEGL-3 (concentração ≥ 20 ppm) | 1484 jardas (1,37 km) |
| AEGL-2 (concentração ≥ 2 ppm) | 1.9 milhas (3,06 km) |
| AEGL-1 (concentração ≥ 0,5 ppm) | 3.1 milhas (4,9 km) |

Fonte: do autor.

## 8.2 Cenário 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$)

No caso 1 (ver Figura 37 e Anexo B), a dimensão do orifício de vazamento é de 1 cm, o vazamento ocorre a 0 m de altura em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 1 hora e vazão média de 133 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 1,1 km de comprimento (concentração ≥ 20 ppm), zona laranja de 3,8 km de comprimento (concentração ≥ 2 ppm) e zona amarela de 7,7 km de comprimento (concentração ≥ 0,5 ppm).

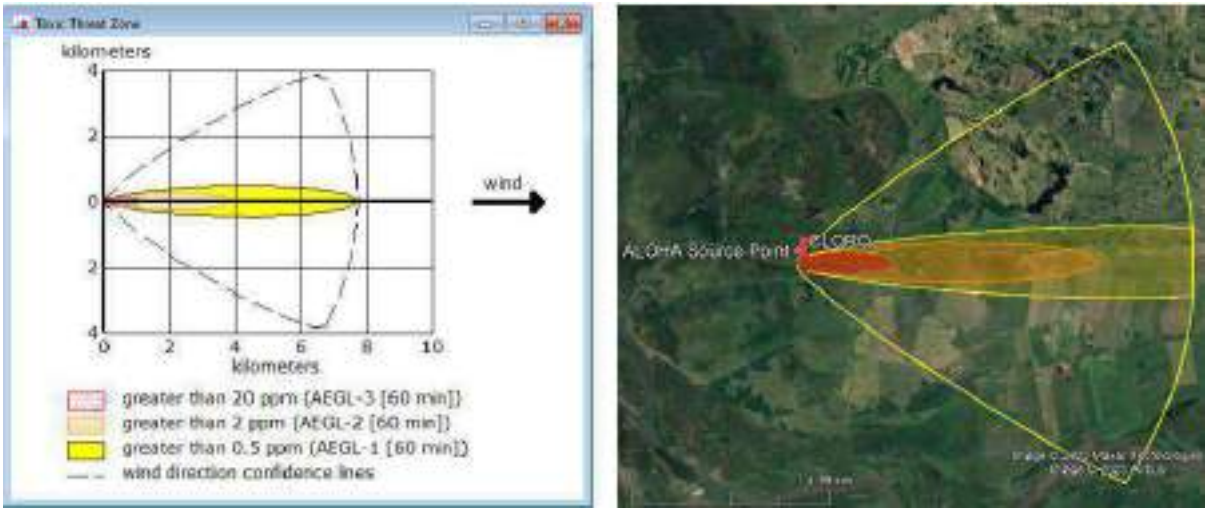


Figura 37 - C1 caso 1: 0 m - Resultados simulados - Cenário 2.
Fonte: do autor.

Ainda no caso 1 (ver Figura 38 e Anexo C), a dimensão do orifício de vazamento é de 1 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 1 hora e vazão média de 9,17 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 279 m de comprimento (concentração ≥ 20 ppm), zona laranja de 940 m de comprimento (concentração ≥ 2 ppm) e zona amarela de 1,9 km de comprimento (concentração ≥ 0,5 ppm).

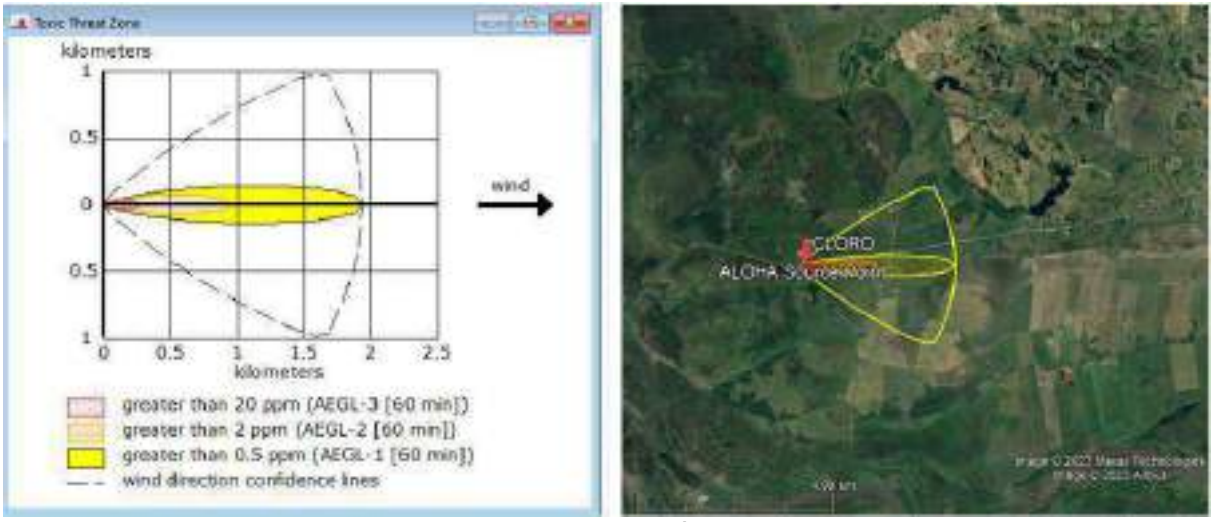


Figura 38 - C1 caso 2: 2 m - Resultados simulados - Cenário 2.
Fonte: do autor.

No caso 2 (ver figura 39 e Anexo D), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 0 m de altura em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 8 minutos e vazão média de 3,300 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 5 km de comprimento (concentração ≥ 20 ppm), zona laranja com mais de 10 km de comprimento (concentração ≥ 2 ppm) e zona amarela com mais de 10 km de comprimento (concentração ≥ 0,5 ppm).

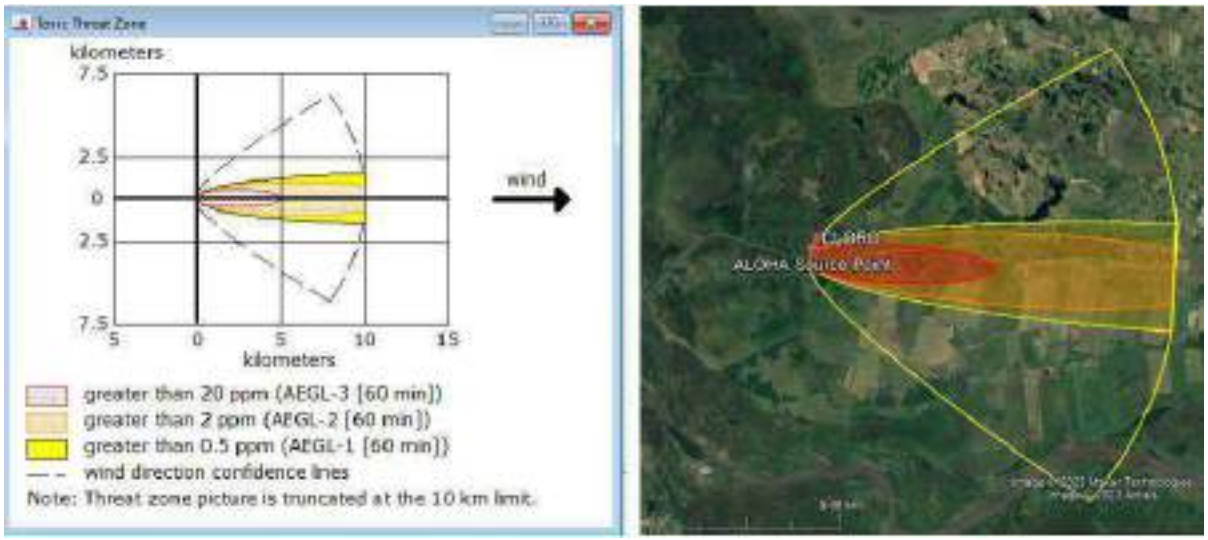


Figura 39 - C2 caso 1: 0 m - Resultados simulados - Cenário 2.
Fonte: do autor.

Ainda no caso 2 (ver Figura 40 e Anexo E), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 1 hora e vazão média de 203 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 1,4 Km de comprimento (concentração ≥ 20 ppm), zona laranja de 4,3 km de comprimento (concentração ≥ 2 ppm) e zona amarela de 8,2 km de comprimento (concentração ≥ 0,5 ppm).

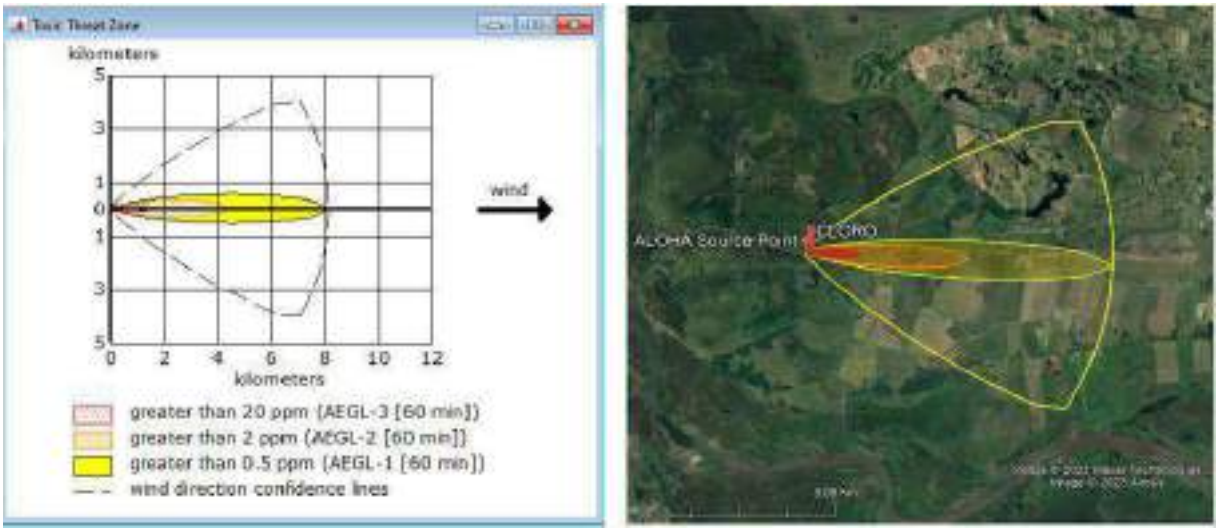


Figura 40 - C2 caso 2: 2 m - Resultados simulados - Cenário 2.
Fonte: do autor.

No caso 3 (ver Figura 41 e anexo F), a dimensão do orifício de vazamento é de 10 cm, o vazamento ocorre a 0 m de altura em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 2 minutos e vazão média de 13.000 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 4,7 km de comprimento (concentração ≥ 20 ppm), zona laranja com mais de 10 km de comprimento (concentração ≥ 2 ppm) e zona amarela com mais de 10 km de comprimento (concentração ≥ 0,5 ppm).

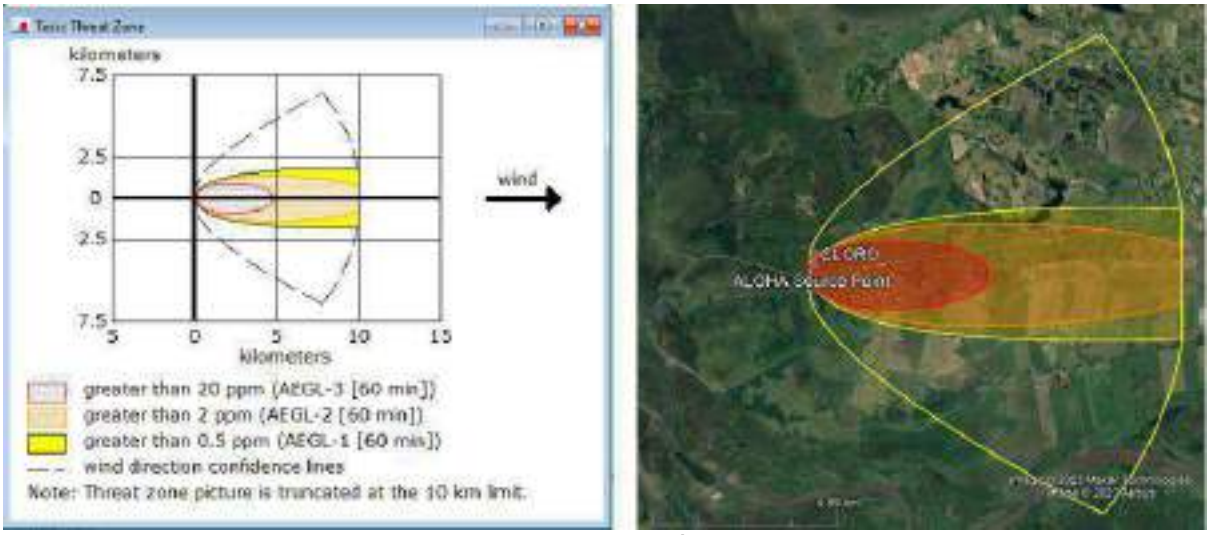


Figura 41 - C3 caso 1: 0 m - Resultados simulados - Cenário 2.
Fonte: do autor.

Ainda no caso 3 (ver Figura 42 e Anexo G), a dimensão do orifício de vazamento é de 10 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 19 minutos e vazão média de 1.280 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 2,6 km de comprimento (concentração ≥ 20 ppm), zona laranja de 6,9 km de comprimento (concentração ≥ 2 ppm) e zona amarela com mais de 10 km de comprimento (concentração ≥ 0,5 ppm).

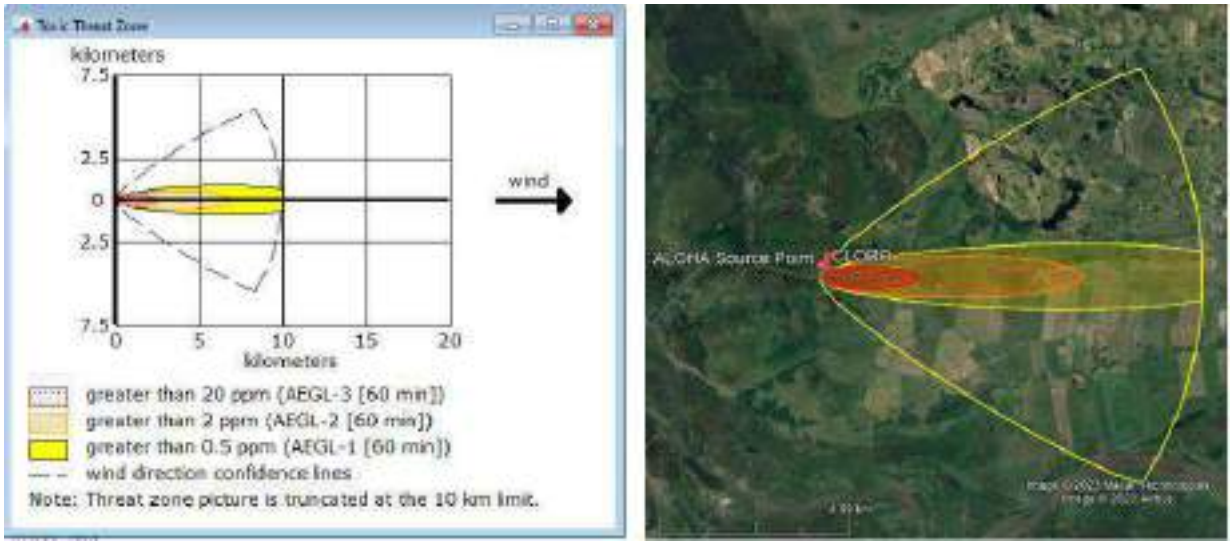


Figura 42 - C3 caso 2: 2 m - Resultados simulados - Cenário 2.
Fonte: do autor.

No caso 4 (ver Figura 43 e Anexo H), a dimensão do orifício de vazamento é de 15 cm, o vazamento ocorre a 0 m de altura em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 1 minuto e vazão média de 402 kg/seg. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 4,4 km de comprimento (concentração ≥ 20 ppm), zona laranja com mais de 10 km de comprimento (concentração ≥ 2 ppm) e zona amarela com mais de 10 km de comprimento (concentração ≥ 0,5 ppm).

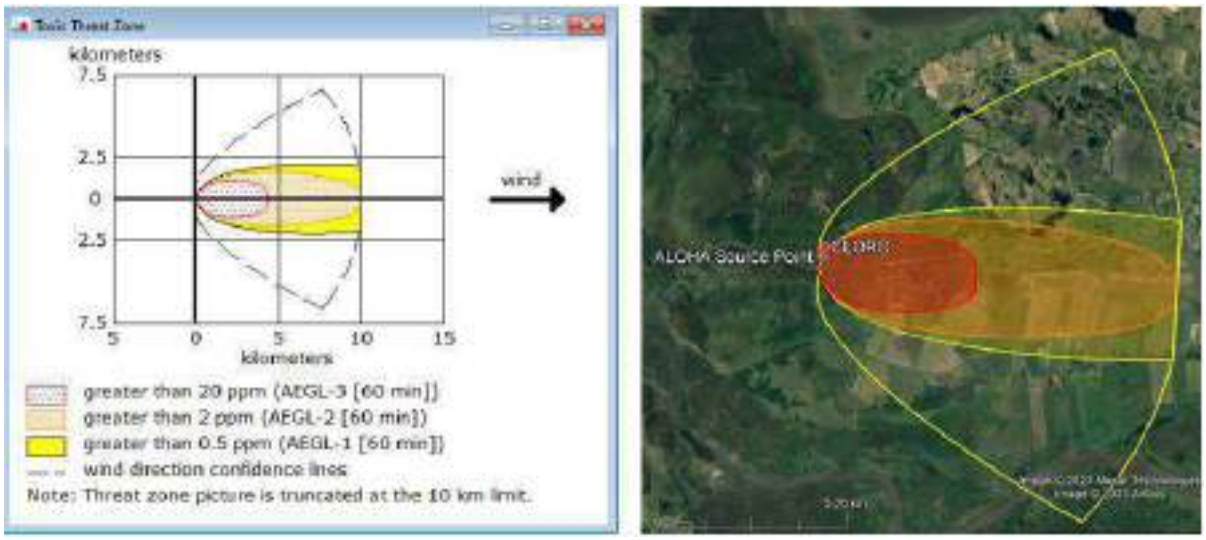


Figura 43 - C4 caso 1: 0 m - Resultados simulados - Cenário 2.
Fonte: do autor.

Ainda no caso 4 (ver Figura 44 e Anexo I), a dimensão do orifício de vazamento é de 15 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado bifásico (gás e aerossol), com duração total de 8 minutos e vazão média de 5.650 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 3,9 km de comprimento (concentração ≥ 20 ppm), zona laranja de 9,6 km de comprimento (concentração ≥ 2 ppm) e zona amarela com mais de 10 km de comprimento (concentração ≥ 0,5 ppm).

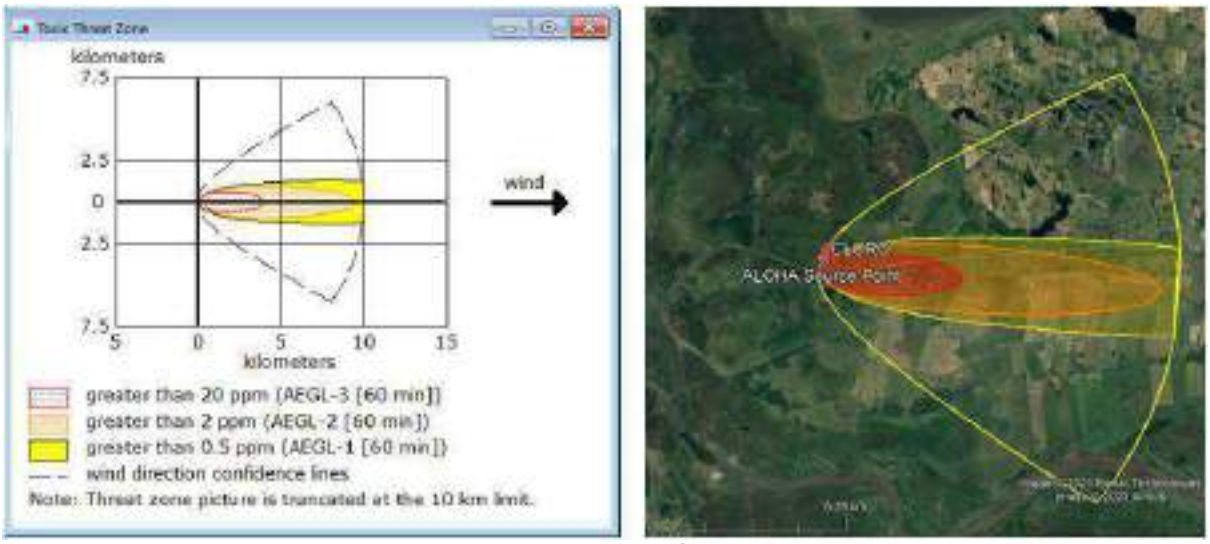


Figura 44 - C4 caso 2: 2 m - Resultados simulados - Cenário 2.
Fonte: do autor.

A forma como o cloro ($Cl_2$) será liberado de um tanque pressurizado dependerá de onde o furo está localizado em relação ao nível do líquido no interior do tanque. Essa localização determinará se a liberação será na forma líquida, gasosa ou bifásica (líquido e gás).

Uma liberação contínua (caso 1 e caso 2) ocorre quando o vazamento acontece gradualmente, com o líquido saindo do tanque em uma taxa constante ao longo do tempo (orifício de ruptura menor que 10 cm).

Se o furo estiver localizado abaixo do nível do líquido no tanque, a liberação do cloro será bifásica, com uma mistura de cloro líquido e gás cloro sendo liberados simultaneamente.

Por outro lado, se o furo estiver localizado acima do nível do líquido no tanque, a liberação do cloro será na forma gasosa, pois o gás cloro pressurizado que está acima do líquido será liberado diretamente na atmosfera.

Já na liberação instantânea (caso 3 e caso 4) ocorre quando o vazamento acontece de forma abrupta, com o líquido saindo do tanque em uma taxa muito alta em um curto período de tempo (orifício de ruptura a partir de 10 cm). Nesse caso, independentemente da localização do furo em relação ao nível do líquido no tanque, a liberação do cloro será predominantemente líquida, com uma pequena quantidade de gás cloro sendo liberada juntamente com o líquido. A alta taxa de vazão instantânea fará com que a pressão interna do tanque caia rapidamente, fazendo com que o líquido saia do tanque em alta velocidade.

A coloração do gás também está relacionada com a concentração, sendo mais verde-amarelada na fase inicial onde a concentração é muito alta.

A Tabela 11 mostra o alcance da nuvem conforme os níveis de concentração tóxica em relação a variação da altura do orifício de vazamento (Tabela 8).

Tabela 11 - Alcance da nuvem tóxica - Cenário 2: Acidente BR-392.

| | | Cenários hipotéticos | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **AEGL** | **C1** | **C2** | **C3** | **C4** |
| Altura do vazamento 0 m | AEGL-3 | 1,1 km | 5,0 km | 4,7 km | 4,4 km |
| | AEGL-2 | 3,8 km | >10 km | >10 km | >10 km |
| | AEGL-1 | 7,7 km | >10 km | >10 km | >10 km |
| Altura do vazamento 2m | AEGL-3 | 279 m | 1,4 km | 2,6 km | 3,9 km |
| | AEGL-2 | 940 m | 4,3 km | 6,9 km | 9,6 km |
| | AEGL-1 | 1,9 km | 8,2 km | >10 km | >10 km |

Fonte: do autor.

A nuvem que teve o maior alcance entre as liberações contínuas, a partir da fonte de vazamento, foi no caso 2, com a altura do orifício de vazamento em 0 m, ou seja, na parte inferior do tanque. A zona vermelha com 5 km de comprimento (20 ppm = AEGL-3 – 60 min), zona laranja com mais de 10 km de comprimento (2 ppm = AEGL-2 – 60 min) e a zona amarela com mais de 10 km de comprimento (0,5 ppm = AEGL-1 – 60 min).

A nuvem que teve o maior alcance entre as liberações instantâneas, a partir da fonte de vazamento, foi no caso 3, com a altura do orifício de vazamento em 0 m. A zona vermelha com 4,7 km de comprimento (20 ppm = AEGL-3 – 60 min), zona laranja com mais de 10 km de comprimento (2 ppm = AEGL-2 – 60 min) e a zona amarela com mais de 10 km de comprimento (0,5 ppm = AEGL-1 – 60 min).

## 8.3 Cenário 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$)

No caso 1 (ver Figura 45 e Anexo J), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 45 minutos e vazão média de 98,9 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 99 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 252 m de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 555 m de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

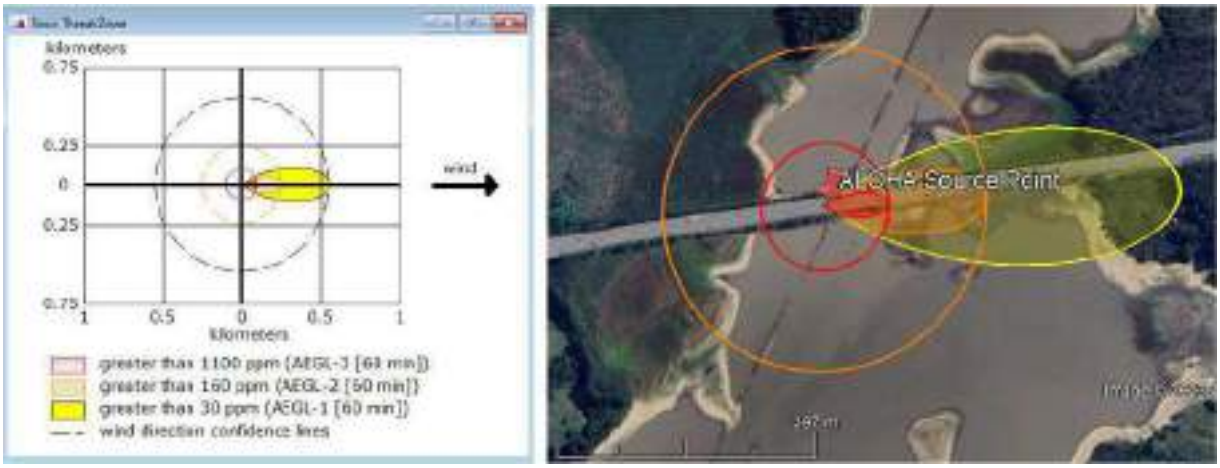


Figura 45 - Caso 1: estabilidade A. Resultados simulados - Cenário 3.
Fonte: do autor.

No caso 2 (ver figura 46 e anexo K), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 45 minutos e vazão média de 98,9 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 103 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 263 m de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 580 m de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

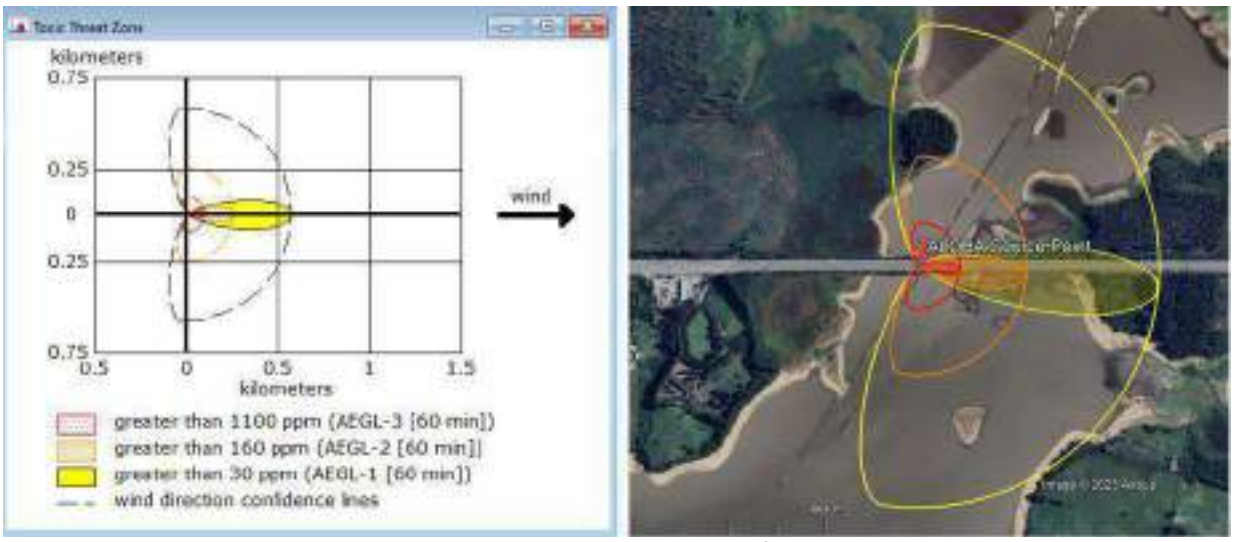


Figura 46 - Caso 2: estabilidade B. Resultados simulados - Cenário 3.
Fonte: do autor.

No caso 3 (ver Figura 47 e Anexo L), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 45 minutos e vazão média de 98,9 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 113 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm),

zona laranja de 298 m de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 695 m de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

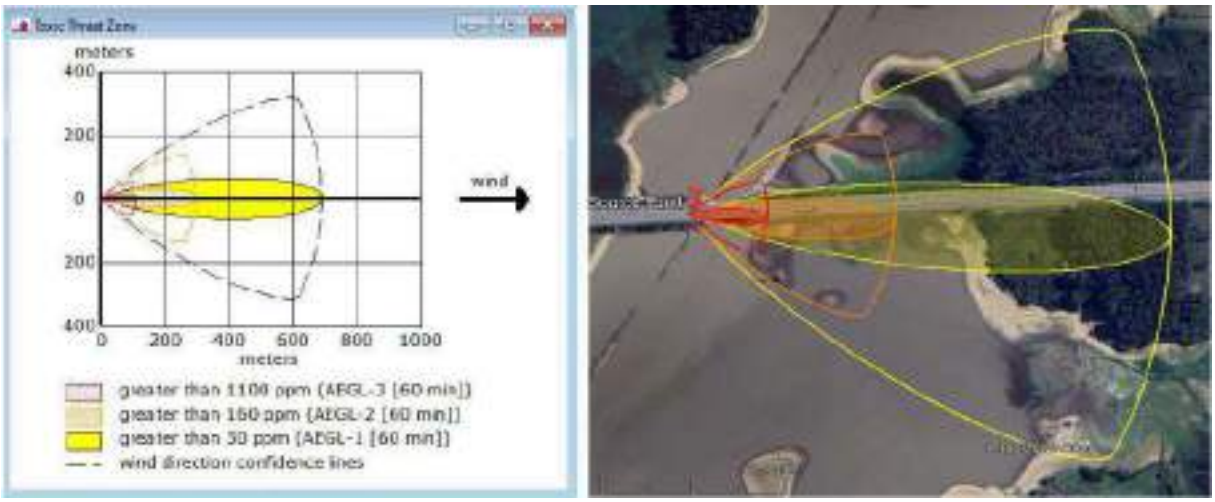


Figura 47 - Caso 3: estabilidade C. Resultados simulados – Cenário 3.
Fonte: do autor.

No caso 4 (ver Figura 48 e Anexo M), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 45 minutos e vazão média de 98,9 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 139 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 374 m de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 904 m de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

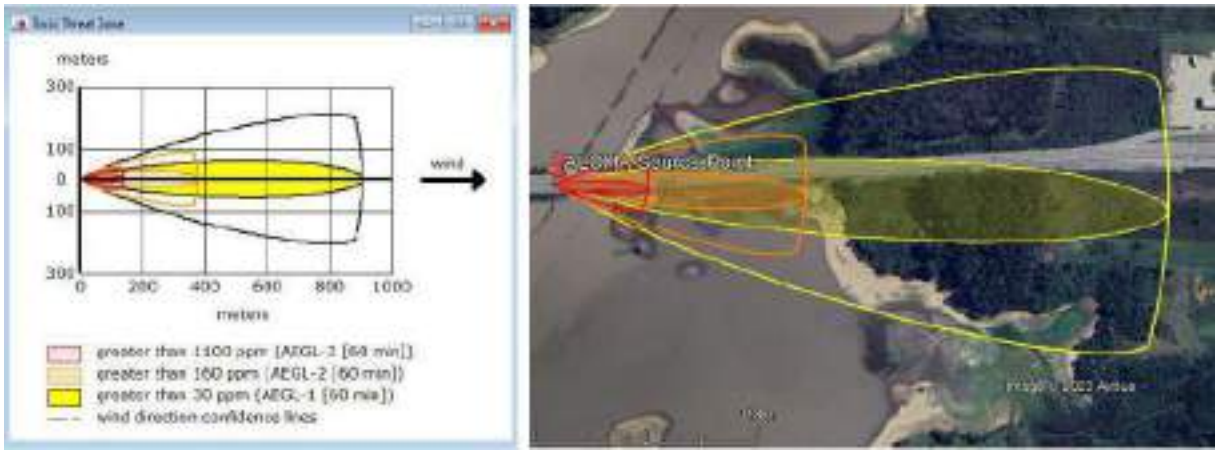


Figura 48 - Caso 4: estabilidade D. Resultados simulados - Cenário 3.
Fonte: do autor.

No caso 5 (ver Figura 49 e Anexo N), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 45 minutos e vazão média de 98,9 kg/min. A liberação gera a favor do vento as

seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 92 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 243 m de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 565 m de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

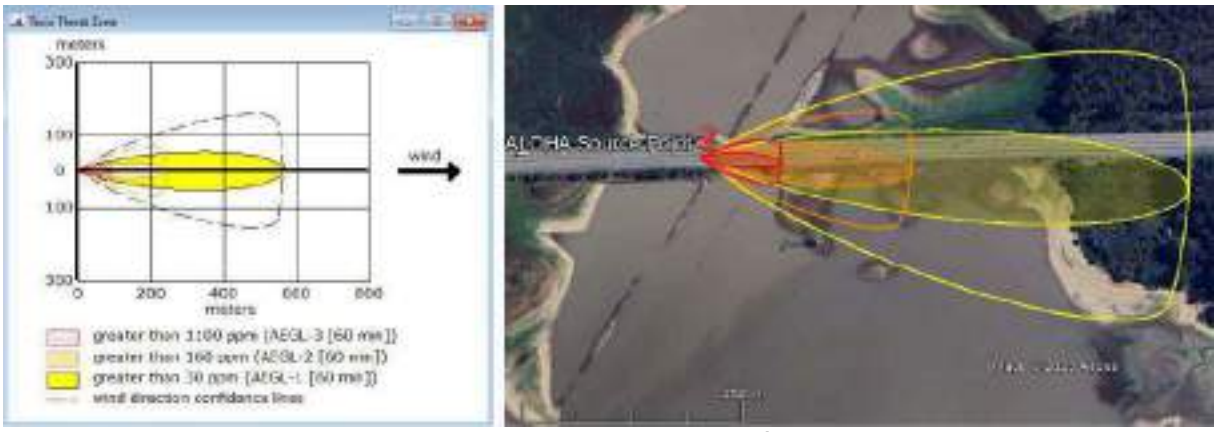


Figura 49 - Caso 5: estabilidade C. Resultados simulados - Cenário 3.
Fonte: do autor.

No caso 6 (ver Figura 50 e Anexo O), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 45 minutos e vazão média de 98,9 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 484 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 1,3 km de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 3,2 km de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

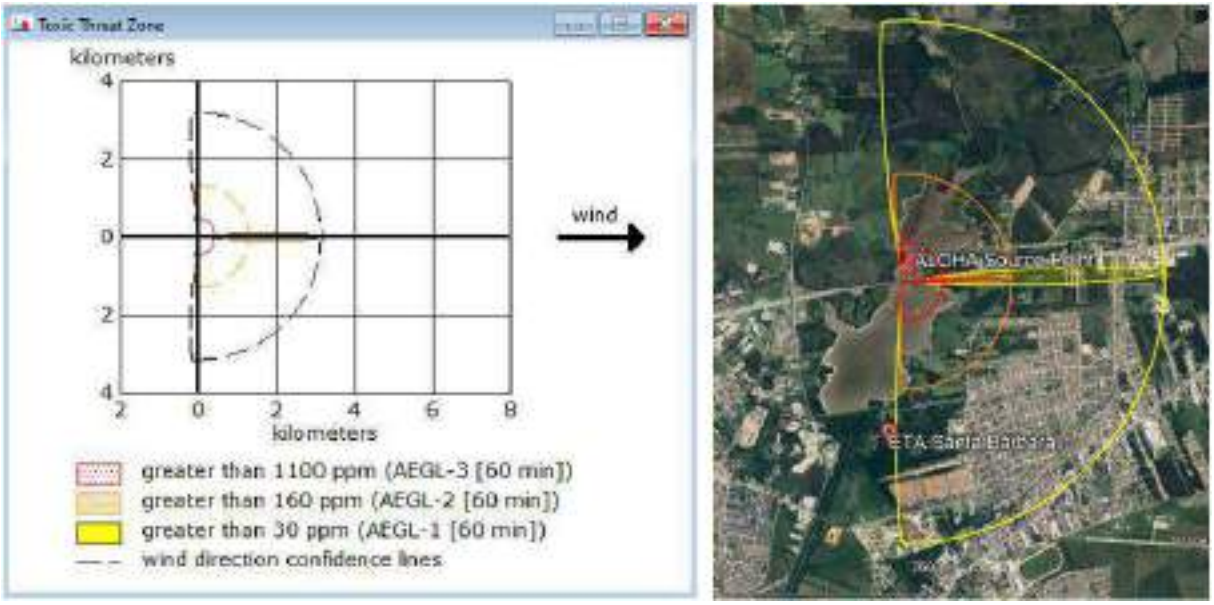


Figura 50 - Caso 6: estabilidade F. Resultados simulados - Cenário 3.
Fonte: do autor.

No caso 7 (ver Figura 51 e Anexo P), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 45 minutos e vazão média de 98,9 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 280 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 818 m de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 2 km de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

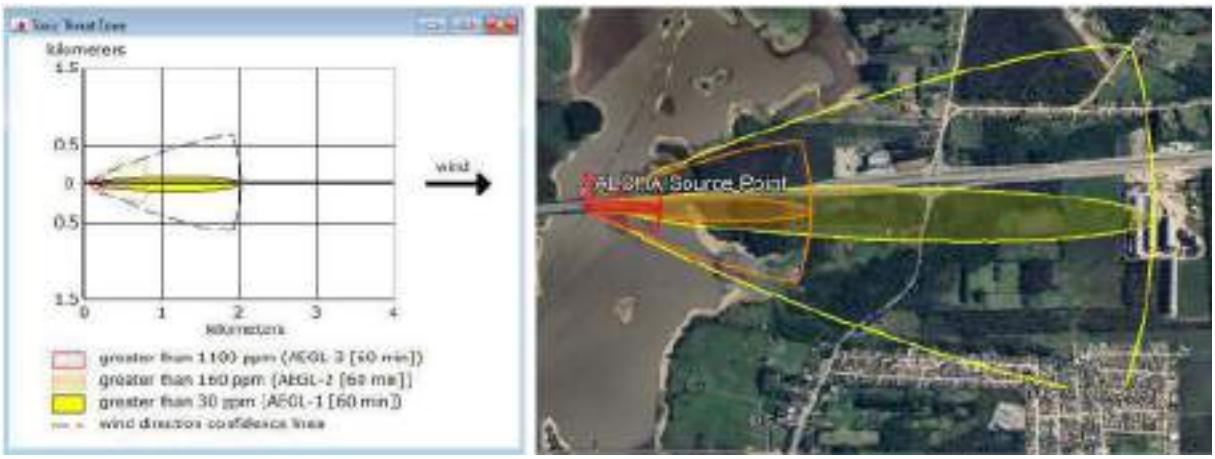


Figura 51 - Caso 7: estabilidade E. Resultados simulados - Cenário 3.
Fonte: do autor.

No caso 8 (ver Figura 52 e Anexo Q), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 45 minutos e vazão média de 98,9 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 139 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 374 m de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 904 m de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

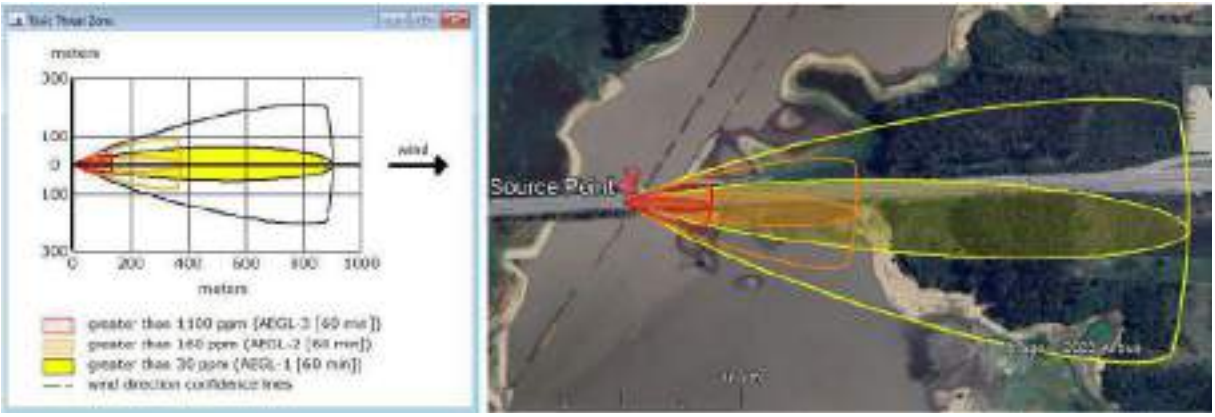


Figura 52 - Caso 8: estabilidade D. Resultados simulados - Cenário 3.
Fonte: do autor.

No caso 9 (ver Figura 53 e Anexo R), a dimensão do orifício de vazamento é de 5 cm, o vazamento ocorre a 2 m de altura em estado gasoso, com duração total de 45 minutos e vazão média de 98,9 kg/min. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 133 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 357 m de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 862 m de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

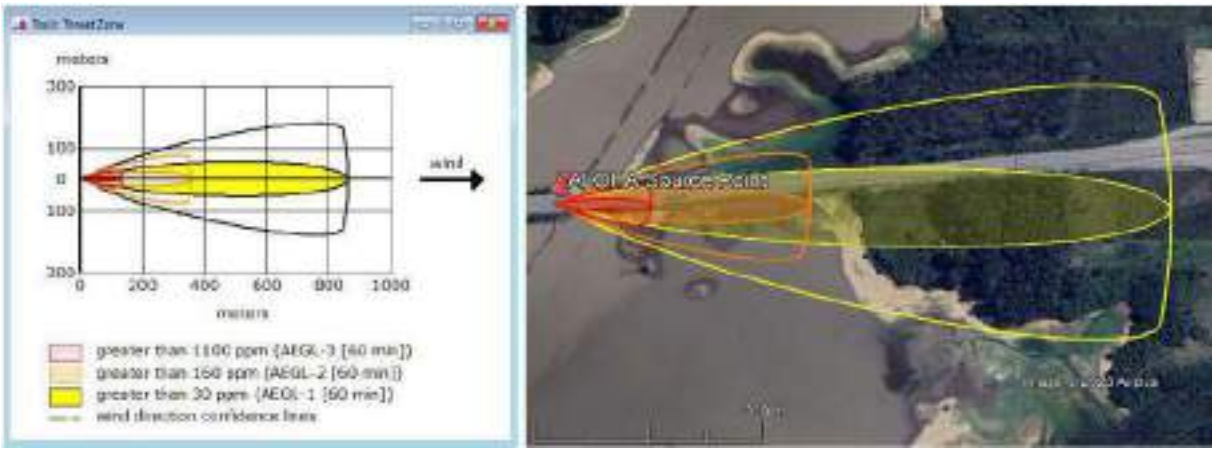


Figura 53 - Caso 9: estabilidade D. Resultados simulados - Cenário 3.
Fonte: do autor.

Assim como o cloro, se o furo estiver localizado abaixo do nível do líquido no tanque, a liberação será bifásica, com uma mistura de amônia líquida e gás sendo liberados simultaneamente.

Por outro lado, se o furo estiver localizado acima do nível do líquido no tanque, como em todas simulações denominadas “Cenário 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$)” a liberação será na forma gasosa, pois o gás pressurizado que está acima do líquido será liberado diretamente na atmosfera.

Conforme as classes de estabilidade atmosféricas de Pasquill (1961), nas classes de estabilidade mais estáveis “A” e “B”, caso 1 e 2, a dispersão da nuvem de amônia tende a ser mais limitada, com uma concentração maior próxima ao solo. A estabilidade atmosférica impede a dispersão vertical eficiente, resultando em um comprimento de dispersão mais curto.

Nas classes de estabilidade moderada “C” e “D”, caso 3, 4, 5, 8, 9, a dispersão da nuvem de amônia pode ser mais eficiente em comparação com as classes mais estáveis. A estabilidade atmosférica permite uma dispersão vertical moderada, o que resulta em um comprimento de dispersão potencialmente maior do que nas classes A e B.

Classes de estabilidade menos estáveis “E” e “F”, caso 6 e 7, a dispersão da nuvem de amônia tende a ser mais ampla e abrangente. A instabilidade atmosférica favorece uma dispersão vertical e horizontal mais eficiente, o que pode resultar em um comprimento de dispersão maior em comparação com as classes mais estáveis.

No período diurno a pluma que teve o maior alcance foi no caso 4, com velocidade do vento de 5,5 m/s, estabilidade “D” e radiação solar fraca. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 139 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 374 m de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 904 m de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

Já no período noturno a pluma que teve o maior alcance foi no caso 6, com velocidade do vento de 2,5 m/s, estabilidade “F” e nebulosidade “pouco nublado”. A liberação gera a favor do vento as seguintes áreas afetadas: zona vermelha de 484 m de comprimento (concentração ≥ 1100 ppm), zona laranja de 1,3 km de comprimento (concentração ≥ 160 ppm) e zona amarela de 3,2 km de comprimento (concentração ≥ 30 ppm).

Importante salientar que é verificado o maior alcance da pluma na zona vermelha (AEGL-3), ou seja, na zona letal. A Tabela 12 mostra resumidamente o alcance da pluma em cada cenário e as concentrações.

Tabela 12 - Alcance da nuvem tóxica - Cenário 3: ETA Santa Bárbara.

| Cenário | AEGL | Distância |
|---|---|---|
| 1 | AEGL-3 (concentração ≥ 1100 ppm) | 99 m |
| | AEGL-2 (concentração ≥ 160 ppm) | 252 m |
| | AEGL-1 (concentração ≥ 30 ppm) | 555 m |
| 2 | AEGL-3 (concentração ≥ 1100 ppm) | 103 m |
| | AEGL-2 (concentração ≥ 160 ppm) | 263 m |
| | AEGL-1 (concentração ≥ 30 ppm) | 580 m |
| 3 | AEGL-3 (concentração ≥ 1100 ppm) | 113 m |
| | AEGL-2 (concentração ≥ 160 ppm) | 298 m |
| | AEGL-1 (concentração ≥ 30 ppm) | 695 m |
| 4 | AEGL-3 (concentração ≥ 1100 ppm) | 139 m |
| | AEGL-2 (concentração ≥ 160 ppm) | 374 m |
| | AEGL-1 (concentração ≥ 30 ppm) | 904 m |
| 5 | AEGL-3 (concentração ≥ 1100 ppm) | 92 m |
| | AEGL-2 (concentração ≥ 160 ppm) | 243 m |
| | AEGL-1 (concentração ≥ 30 ppm) | 565 m |
| 6 | AEGL-3 (concentração ≥ 1100 ppm) | 484 m |
| | AEGL-2 (concentração ≥ 160 ppm) | 1.3 km |
| | AEGL-1 (concentração ≥ 30 ppm) | 3.2 km |
| 7 | AEGL-3 (concentração ≥ 1100 ppm) | 280 m |
| | AEGL-2 (concentração ≥ 160 ppm) | 818 m |
| | AEGL-1 (concentração ≥ 30 ppm) | 2 km |
| 8 | AEGL-3 (concentração ≥ 1100 ppm) | 139 m |
| | AEGL-2 (concentração ≥ 160 ppm) | 374 m |
| | AEGL-1 (concentração ≥ 30 ppm) | 904 m |
| 9 | AEGL-3 (concentração ≥ 1100 ppm) | 133 m |
| | AEGL-2 (concentração ≥ 160 ppm) | 357 m |
| | AEGL-1 (concentração ≥ 30 ppm) | 862 m |

Fonte: do autor.

## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os acidentes envolvendo vazamento e derramamentos com produtos perigosos durante o transporte rodoviário representam uma séria ameaça, podendo resultar em consequências graves, como fatalidades, ferimentos, evacuações em larga escala, perdas econômicas significativas e danos ambientais incalculáveis. O início de uma emergência química até pode ser previsto, mas os limites do alcance dela não.

Várias normas e cuidados específicos devem ser levados a sério quando falamos de transporte de produtos perigosos, pois existem grandes riscos na movimentação destes produtos, destacam-se a falta de inspeção e manutenção do veículo, falhas no sistema de segurança, motoristas privados de sono adequado, pressão por entrega rápida, negligência ao lidar com emergências e tombamento da carga como foi analisado no cenário 2.

O atendimento a essas emergências, deve ser feito por profissionais que tenham conhecimento, capacitação ou habilitação para tal e possuam recursos materiais em condições operacionais. Mesmo para estes profissionais o atendimento apresenta um potencial de risco elevado, uma vez que representa uma situação anormal e fora de controle onde as atividades operacionais são executadas da forma mais adversa possível.

O investimento em tecnologias cada vez mais avançadas é imprescindível para se desenvolver um trabalho eficaz e acima de tudo quando se trata de segurança. O uso de *softwares* e equipamentos de última geração, gestores e pessoal capacitado são requisitos básicos para as empresas que se preocupam com segurança.

Para lidar com essa situação, com a utilização do *software* ALOHA, foi possível estimar as zonas de perigo de acordo com a classificação AEGL (60 min). Desta maneira, 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 de todas as organizações que de alguma forma estão ligadas à segurança do trânsito nas rodovias.

No cenário 1 foi apresentado uma simulação de um exemplo fictício do manual do ALOHA, e os resultados obtidos foram iguais aos apresentados no manual, demonstrando assim, a correta utilização deste *software*.

A obtenção dessas informações é fundamental para a implementação de medidas de prevenção e resposta a emergências, como a adoção de rotas alternativas para o transporte de substâncias perigosas, o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce e o treinamento adequado de equipes de emergência.

Além disso, a conscientização pública sobre os riscos associados ao transporte de produtos perigosos é crucial para promover uma abordagem proativa na redução desses acidentes. É sugerido que a população próxima a ETA Santa Bárbara, cenário 3, localizada na área mais vulnerável, 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 seria uma medida útil de prevenção.

No entanto, devido à sua natureza simplificada, o ALOHA pode não ser adequado para análises mais complexas ou de longo prazo. Essas simplificações podem levar a resultados aproximados e não capturar completamente todos os aspectos do evento.

Portanto, é essencial ter consciência das limitações do modelo e utilizar outras abordagens complementares, como simulações mais avançadas ou estudos mais detalhados, para obter uma compreensão mais completa e precisa dos potenciais impactos de acidentes com vazamento de gases. Além dos modelos operacionais e a comparação de diferentes resultados com outros *softwares*.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se também a inclusão de diferentes condições de modelagem da dispersão atmosférica. Por exemplo, diferentes condições meteorológicas ou topográficas, presença de obstáculos ou terrenos complexos, substâncias químicas diferentes, como a classe 3 (classe dos líquidos), apresenta o maior número de registros de acidentes no transporte rodoviário.

Outro aspecto interessante a ser investigado seria o estudo da modelagem nos recursos hídricos, avaliar o comportamento de diferentes classes de produtos na água é necessário.

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 e do gás amônia.

## REFERÊNCIAS

ALOHA versão 5.4.7. U.S. Environmental Protection Agency e National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <http://www.epa.gov/osweroe1/content/cameo/aloha.htm>. Acesso em: 7 Mar. 2022.

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres. (2018) “Manual de fiscalização do transporte rodoviário nacional e internacional de Produtos Perigosos” – TRPP. Brasília.

AUBURTIN, PICHARD, SCHORSCH, Toxicité aiguë de l'ammoniac, rapport INERIS, May 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA (ABIQUIM). Manual para atendimento de emergências com produtos perigosos. 4.ed. São Paulo,1999; 340p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14064: Atendimento a emergência no Transporte de Produtos Perigosos, 2003;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7500: Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos, 2017.

BARA, DUSSERRE, The use of water curtains to protect firemen in case of heavy gas dispersion, Journal of Loss prevention in the process industries, vol. 10, No. 3, pp 179-180, 1997.

BLANKEN, Behaviour of ammonia in the event of a spillage, Ammonia safety plant, 22, 1980, quoted by Wheatley (April 1987).

BRASIL. Portaria Nº 5232, de 14 de dezembro de 2016. Aprova as Instruções Complementares ao Regulamento Terrestre do Transporte de Produtos Perigosos, e dá outras providências.

BRASIL. Portaria Nº 3665, de 4 de maio de 2011. Atualiza o Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos.

BRITTER, R. E. Recent research on the dispersion of hazardous materials. Luxembourg: Office for Official Publications of the European communities, 1998. 234p.

BOUET, Essais de dispersion atmosphérique, INERIS, Rapport annuel, 1996.

BUBBICO, R.; MAZZAROTTA, B.; VERDONE, N. CFD analysis of the dispersion of toxic materials in road tunnels. Journal of Loss Prevention in the Process industries, v.28, p. 47-59, 2014.

CARDOSO JUNIOR, M. M.; SCARPEL, R. A. Estimativa do risco individual e social para o transporte de produtos perigosos pelo modal rodoviário utilizando um modelo simplificado. 2012.

CASAL J. (2008). Evaluation of the effects and consequences of major acidentes in industrial plants. Hungary: Industrial Safety Series. v.8. 317 p. Elsevier BV.
CBM/GO. CORPO DE BOMBEIROS DE GOIAS. Manual Operacional de Bombeiros – Operações envolvendo Produtos Perigosos. 2017.

CBM/RS. CORPO DE BOMBEIROS DO RIO GRANDE DO SUL. Manual Operacional de Bombeiros – Operações envolvendo Produtos Perigosos. 2023.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. (2005). Setor de Operações de Emergência. “Relatório de atendimento em acidentes ambientais no transporte rodoviário de produtos perigosos 1983 a 2004”. São Paulo.

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. 2023.

COLENBRANDER, G.W. A mathematical model for the transiente behavior of dense vapor cloud. 3 International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. Basel, 1980.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J.F. Chemical process safety – Fundamentals with applications. 3rd ed. Massachusetts, Prentice Hall, 2011. 723 p.

Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul. Vídeo (1:06 min). 17 anos da comissão estadual P2R2. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=A7CMc88Zvzo&t=1917s>. acesso em: 5 jun. 2022.

EPA - Environmental Protection Agency. (1999). Access Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) Values. USA.

FEIJÓ, Frederico. Caminhão que tombou com produto químico causa bloqueio na BR-392, entre Pelotas e Rio Grande. GauchaZH, 15 out. 2021. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/transito/noticia/2021/10/caminhao-que-tomboucom produto-quimico-causa-bloqueio-na-br-392-entre-pelotas-e-rio-grande ckush01y40042019mm7jiw9la.html >. Acesso em 15 jan. 2023.

FEPAM, Relatório 2019: Divisão de Emergências Ambientais – DEAMB. Porto Alegre, RS. 2019, 18 p. Disponível em: <http://ww3.fepam.rs.gov.br/emergencia/DEAMB_Relatorio_2019.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2022.

FISPQ – Ficha de Informação do Produto Químico. (2014). Amônia Anidra. Cetesb. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

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.

GOOGLE. Programa do Google Maps - 2021. Disponível em: < https://www.google.com.br/maps/preview>. Acesso em: 10 mar. 2022.

GOLDWIRE et al., Desert Tortoise series data report 1983 pressurizedspills. UCID 20562, 1985.

GOLDWIRE, Large-Scale Ammonia Spill Tests. A series of ammonia spill tests found that improved simple models are needed for predicting the consequences of accidental releases. Chemical Engineering Progress, pp 35-41, April 1986.

HADDAD, Edson. Capacidade de resposta dos órgãos públicos aos acidentes ocorridos no transporte rodoviário de produtos perigosos na cidade de São Paulo. 2017. 160 p. Dissertação (Programa de Mestrado Profissional em Administração - Gestão Ambiental e Sustentabilidade) - Universidade Nove de julho - UNINOVE, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/1933>. Acesso em: 29 maio 2023.

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. 2022.

HAVENS, J.; SPICER, T.O. Application of dispersion models to flammable cloud analysis. Journal of Hazardous Materials, v. 49, p. 115 – 124, 1996.

IANELLO, ROTHE, WALLIS, Aerosol Research Program: improved source term definition for modeling the ambient impact of accidental release of hazardous liquids, Paper presented at the 6th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion on the Process Industries, Oslo, Norway, 1989.

INERIS, Institut National de lénvironnement industriel et des Risques. Work Study 10072: Ammonia: large-scale atmospheric dispersiom tests, 2005. 130 p.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos do INMET, 2021. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/#>. Acesso em: 25 março 2023.

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>. Acesso em: 20 nov. 2022.

KOOPMAN, R. P.; ERMAK, D. L.; CHAN, T. S. A review of recent field tests and mathematical modelling of atmospheric dispersion of large spills of denser-than-air gases. Atmospheric Environment, v. 23, n. 4, p. 731-745, 1989.

MAIOLI, O. L. G.; NASCIMENTO, G. N. D. Composição da Atmosfera, Ciclos Globais e Tempo de Vida. Universidade Federal do Espirito Santo. Departamento de

Engenharia Ambiental, 2005. Disponível em: <http://www.inf.ufes.brTrabalho_Gil_e_Otavio>. Acesso em: 10 nov. 2022.

NYRÉN et al., Discharge trials with liquefied ammonia at Simpra, Landskrona, Sweden, Swedish National Defence Research Institute, FOA report E40009, 1983, quoted by Wheatley (April 1987).
NOAA/HMRAD; EPA/CEPPO, ALOHA Users Manual and Theoretical Description. 1992.

RESPLANDY, Etude expérimentale des propriétés de l'ammoniac conditionnant les mesures à prendre pour la sécurité du voisinage des stockages industriels. Chimie et Industrie - Génie chimique, Vol. 102, n°6, October 1969.

RFI. França lembra 20 anos da explosão na usina AZF: um dos piores acidentes industriais do país. RFI. 21 set. 2021. <https://www.rfi.fr/br/fran%C3%A7a/20210921-fran%C3%A7a-lembra-20-anos-da-explos%C3%A3o-na-usina-azf-um-dos-piores-acidentes-industriais-do-pa%C3%ADs>. Acesso em 15 jan. 2023

OGLOBO. Vazamento de gás tóxico causa explosão e deixa ao menos 13 mortos na Jordânia. OGlobo. 27 jun. 2022. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/mundo/noticia/2022/06/vazamento-de-gas-toxico-causa-explosao-e-deixa-ao-menos-dez-mortos-na-jordania-veja-video.ghtml>. Acesso em: 4 jan. 2023.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; PIMENTEL, L. C. G.; LANDAU, L. Critérios de estabilidade atmosférica para a região da central nuclear Almirante Álvaro Alberto, Angra dos Reis – RJ. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.2, 2010. 270 – 285p.

PALAZZI, e.; de Faveri, Dante; Fumarola, Giuseppe; Ferraiolo, g. (1982). Diffusion from a Steady Source of Short Duration. Journal Atmospheric Environment, vol. 16, p 2785- 2790.

PASQUILL F. (1961), "The Estimation of the Dispersion of Windborne Material." Meteorology Magazine no. 90: 33-49.

POMARES, Miguel Albaladejo *et al*. GUÍA OPERATIVA: Actuaciones con amoniaco para bomberos. Espanha: Sts Protección, 2019. 146 p. Disponível em: <https://www.sts-proteccion.com/documentos/GUIA-AMONIACO-BOMBEROS.pdf>. Acesso em: 29 maio 2022.

POMARES, Miguel Albaladejo *et al*. GUÍA OPERATIVA: Actuaciones con cloro para bomberos. Espanha: Sts Protección, 2019. 135 p. Disponível em: https://www.bombersdv.es/wp-content/uploads/2019/02/V8-MANUAL-CLORO-GT11-2_protegida.pdf. Acesso em: 30 maio 2022.

PUTTOCK, J. S.; BLACMORE, D. R.; COLENBRANDER, G. W. Field experiments on dense gas dispersion. Journal of Hazardous Materials, v. 6, p. 13-41, 1982

REED, Containment of leaks from vessels containing liquefied gases with particular reference to ammonia, 1st international symposium on loss prevention and safety

promotion in the process industries, The Hague, pp. 191-195, Elsevier, 1974, quoted by Wheatley (April 1987).

ROCHA, Marco. Revista Emergência. São Paulo, Edição 36, 2007, 95 p.

SILVA, Dennis. Revista Emergência. São Paulo ,2017, 10 p. Disponível em: <https://www.bombeiros.go.gov.br/wp-content/uploads/2017/11/Material-divulgado-Revista-Emerg%C3%AAncia-Especial-104.pdf>.

EMFA (European Fertilizer Manufacturer's Association, Zurich), IFA (International Fertilizer Industry Association Limited, Paris), Hazardous properties of ammonia, 1990, quoted by SNIE (1991).

SOARES, O. S. (2021). 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. UERGS, Bento Gonçalves, RS.

SPICER, TOM; HAVENS, JERY. (1989), User's guide for the degadis 2.1 - Dense Gas Dispersion Model .419p.

TAVARES, R. A. M. Accidental release of hazardous gases: modelling and assessing risks. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. Tese de Doutorado, 2011.

TEIXEIRA, M. S. (2010). Análise e prognóstico dos acidentes no transporte rodoviário de produtos perigosos no município de São Paulo (1989 a 2008) - Situação e cenários de risco (Dissertação de mestrado). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, são Paulo, SP. Brasil. Disponível em: http://emergenciasquimicas.cetesb.sp.gov.br/artigos-e-documentostecnicos/teses/. Acesso em: 28 jan. 2023.

TURNER, Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, US, Department of Health Education and Welfare, NTIS, Cincinnati, Ohio, 1970.

VAN ULDEN, A.P. The spreading and mixing of dense gas clouds in still air, Debilt: Scientific Report WR 87-12, 1987. 107 p.

# Anexos

ANEXO A – Estudo de caso 1: Manual ALOHA - Cloro ($Cl_2$).

Text Summary

```
SITE DATA:
  Location: MANASSAS, VIRGINIA
  Building Air Exchanges Per Hour: 0.58 (unsheltered single storied)
  Time: June 4, 2016  1500 hours EDT (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: -29.5° F
  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: 6 miles/hour from E at 3 meters
  Ground Roughness: open country         Cloud Cover: 3 tenths
  Air Temperature: 72° F                 Stability Class: C
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 80%

SOURCE STRENGTH:
  Direct Source: 450 pounds              Source Height: 0
  Release Duration: 1 minute
  Release Rate: 7.5 pounds/sec
  Total Amount Released: 450 pounds
  Note: This chemical may flash boil and/or result in two phase flow.

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red    : 1484 yards --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 1.9 miles --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 3.1 miles --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO B – Estudo de caso 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$) - Caso 1: 0m.

Text Summary

```
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: 3.7 meters/second from N at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 28.4° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 63%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6.5 meters
  Tank Volume: 20.4 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 28.4° C
  Chemical Mass in Tank: 24,095 kilograms
  Tank is 85% full
  Circular Opening Diameter: 1 centimeters
  Opening is 0 meters from tank bottom
  Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour
  Max Average Sustained Release Rate: 133 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 7,869 kilograms
  Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red    : 1.1 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 3.8 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 7.7 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO C – Estudo de caso 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$) - Caso 1: 2m.

Text Summary

```
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: 3.7 meters/second from N at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 28.4° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 63%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6.5 meters
  Tank Volume: 20.4 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 28.4° C
  Chemical Mass in Tank: 24,095 kilograms
  Tank is 85% full
  Circular Opening Diameter: 1 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour
  Max Average Sustained Release Rate: 9.17 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 520 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red    : 279 meters --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 940 meters --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 1.9 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO D – Estudo de caso 2: Acidente BR-392 - Cloro (Cl2) - Caso 2: 0m.

Text Summary

```
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: 3.7 meters/second from N at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 28.4° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 63%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6.5 meters
  Tank Volume: 20.4 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 28.4° C
  Chemical Mass in Tank: 24,095 kilograms
  Tank is 85% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 0 meters from tank bottom
  Release Duration: 8 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 3,300 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 24,095 kilograms
  Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red    : 5.0 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: greater than 10 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: greater than 10 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO E – Estudo de caso 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$) - Caso 2: 2m.

Text Summary

```
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: 3.7 meters/second from N at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 28.4° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 63%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6.5 meters
  Tank Volume: 20.4 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 28.4° C
  Chemical Mass in Tank: 24,095 kilograms
  Tank is 85% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: ALOHA limited the duration to 1 hour
  Max Average Sustained Release Rate: 203 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 4,617 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red    : 1.4 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 4.3 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 8.2 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO F – Estudo de caso 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$) - Caso 3: 0m.

Text Summary

```
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: 3.7 meters/second from N at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 28.4° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 63%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6.5 meters
  Tank Volume: 20.4 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 28.4° C
  Chemical Mass in Tank: 24,095 kilograms
  Tank is 85% full
  Circular Opening Diameter: 10 centimeters
  Opening is 0 meters from tank bottom
  Release Duration: 2 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 13,000 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 24,095 kilograms
  Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red    : 4.7 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: greater than 10 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: greater than 10 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO G – Estudo de caso 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$) - Caso 3: 2m.

Text Summary

```
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: 3.7 meters/second from N at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 28.4° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 63%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6.5 meters
  Tank Volume: 20.4 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 28.4° C
  Chemical Mass in Tank: 24,095 kilograms
  Tank is 85% full
  Circular Opening Diameter: 10 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: 19 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 1,280 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 5,140 kilograms
  Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red    : 2.6 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 6.9 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: greater than 10 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO H – Estudo de caso 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$) - Caso 4: 0m.

Text Summary

```
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: 3.7 meters/second from N at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 28.4° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 63%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6.5 meters
  Tank Volume: 20.4 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 28.4° C
  Chemical Mass in Tank: 24,095 kilograms
  Tank is 85% full
  Circular Opening Diameter: 15 centimeters
  Opening is 0 meters from tank bottom
  Release Duration: 1 minute
  Max Average Sustained Release Rate: 402 kilograms/sec
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 24,095 kilograms
  Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red    : 4.4 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: greater than 10 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: greater than 10 kilometers --- (0.5 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO I – Estudo de caso 2: Acidente BR-392 - Cloro ($Cl_2$) - Caso 4: 2m.

Text Summary

```
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: 3.7 meters/second from N at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 28.4° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 63%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Non-flammable chemical is escaping from tank
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6.5 meters
  Tank Volume: 20.4 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 28.4° C
  Chemical Mass in Tank: 24,095 kilograms
  Tank is 85% full
  Circular Opening Diameter: 15 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Note: RAILCAR predicts a stationary cloud or 'mist pool' will form.
  Model Run: traditional ALOHA tank
  Release Duration: 8 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 5,650 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 8,192 kilograms
  Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).

THREAT ZONE:
  Model Run: Heavy Gas
  Red    : 3.9 kilometers --- (20 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 9.6 kilometers --- (2 ppm = AEGL-2 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO J - Estudo de caso 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) - Cenário 1.

Text Summary

```
  Chemical Name: AMMONIA
  CAS Number: 7664-41-7                    Molecular Weight: 17.03 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 30 ppm   AEGL-2 (60 min): 160 ppm   AEGL-3 (60 min): 1100 ppm
  IDLH: 300 ppm      LEL: 150000 ppm     UEL: 280000 ppm
  Ambient Boiling Point: -33.4° 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: 2 meters/second from SW at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 20° C
  Stability Class: A (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Flammable chemical escaping from tank (not burning)
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6 meters
  Tank Volume: 18.8 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 20° C
  Chemical Mass in Tank: 9,213 kilograms
  Tank is 80% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: 45 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 98.9 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 1,597 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Gaussian
  Red    : 99 meters --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 252 meters --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 555 meters --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO K - Estudo de caso 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) – Cenário 2.

Text Summary

```
  Chemical Name: AMMONIA
  CAS Number: 7664-41-7                    Molecular Weight: 17.03 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 30 ppm   AEGL-2 (60 min): 160 ppm   AEGL-3 (60 min): 1100 ppm
  IDLH: 300 ppm      LEL: 150000 ppm     UEL: 280000 ppm
  Ambient Boiling Point: -33.4° 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: 2.5 meters/second from SW at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 5 tenths
  Air Temperature: 20° C
  Stability Class: B (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Flammable chemical escaping from tank (not burning)
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6 meters
  Tank Volume: 18.8 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 20° C
  Chemical Mass in Tank: 9,213 kilograms
  Tank is 80% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: 45 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 98.9 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 1,597 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Gaussian
  Red    : 103 meters --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 263 meters --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 580 meters --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO L - Estudo de caso 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) – Cenário 3.

Text Summary

```
  Chemical Name: AMMONIA
  CAS Number: 7664-41-7                    Molecular Weight: 17.03 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 30 ppm   AEGL-2 (60 min): 160 ppm   AEGL-3 (60 min): 1100 ppm
  IDLH: 300 ppm      LEL: 150000 ppm     UEL: 280000 ppm
  Ambient Boiling Point: -33.4° 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: 4 meters/second from SW at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 10 tenths
  Air Temperature: 20° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Flammable chemical escaping from tank (not burning)
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6 meters
  Tank Volume: 18.8 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 20° C
  Chemical Mass in Tank: 9,213 kilograms
  Tank is 80% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: 45 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 98.9 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 1,597 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Gaussian
  Red    : 113 meters --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 298 meters --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 695 meters --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO M - Estudo de caso 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) – Cenário 4.

Text Summary

```
CHEMICAL DATA:
  Chemical Name: AMMONIA
  CAS Number: 7664-41-7                    Molecular Weight: 17.03 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 30 ppm   AEGL-2 (60 min): 160 ppm   AEGL-3 (60 min): 1100 ppm
  IDLH: 300 ppm      LEL: 150000 ppm     UEL: 280000 ppm
  Ambient Boiling Point: -33.4° 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: 5.5 meters/second from SW at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 10 tenths
  Air Temperature: 20° C                 Stability Class: D
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Flammable chemical escaping from tank (not burning)
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6 meters
  Tank Volume: 18.8 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 20° C
  Chemical Mass in Tank: 9,213 kilograms
  Tank is 80% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: 45 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 98.9 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 1,597 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Gaussian
  Red    : 139 meters --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 374 meters --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 904 meters --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO N - Estudo de caso 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) – Cenário 5.

Text Summary

```
  Chemical Name: AMMONIA
  CAS Number: 7664-41-7                    Molecular Weight: 17.03 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 30 ppm   AEGL-2 (60 min): 160 ppm   AEGL-3 (60 min): 1100 ppm
  IDLH: 300 ppm      LEL: 150000 ppm     UEL: 280000 ppm
  Ambient Boiling Point: -33.4° 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: 6 meters/second from SW at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 0 tenths
  Air Temperature: 20° C
  Stability Class: C (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Flammable chemical escaping from tank (not burning)
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6 meters
  Tank Volume: 18.8 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 20° C
  Chemical Mass in Tank: 9,213 kilograms
  Tank is 80% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: 45 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 98.9 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 1,597 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Gaussian
  Red    : 92 meters --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 243 meters --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 565 meters --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO O - Estudo de caso 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) – Cenário 6.

Text Summary

```
  AEGL-1 (60 min): 30 ppm   AEGL-2 (60 min): 160 ppm   AEGL-3 (60 min): 1100 ppm
  IDLH: 300 ppm      LEL: 150000 ppm     UEL: 280000 ppm
  Ambient Boiling Point: -33.4° 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: 2.5 meters/second from SW at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 7 tenths
  Air Temperature: 20° C
  Stability Class: F (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Flammable chemical escaping from tank (not burning)
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6 meters
  Tank Volume: 18.8 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 20° C
  Chemical Mass in Tank: 9,213 kilograms
  Tank is 80% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Note: RAILCAR predicts a stationary cloud or 'mist pool' will form.
  Model Run: traditional ALOHA tank
  Release Duration: 45 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 98.9 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 1,597 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Gaussian
  Red    : 484 meters --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 1.3 kilometers --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 3.2 kilometers --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO P - Estudo de caso 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) – Cenário 7.

Text Summary

```
  Chemical Name: AMMONIA
  CAS Number: 7664-41-7                  Molecular Weight: 17.03 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 30 ppm   AEGL-2 (60 min): 160 ppm   AEGL-3 (60 min): 1100 ppm
  IDLH: 300 ppm      LEL: 150000 ppm     UEL: 280000 ppm
  Ambient Boiling Point: -33.4° 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: 4 meters/second from SW at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 7 tenths
  Air Temperature: 20° C
  Stability Class: E (user override)
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Flammable chemical escaping from tank (not burning)
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6 meters
  Tank Volume: 18.8 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 20° C
  Chemical Mass in Tank: 9,213 kilograms
  Tank is 80% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: 45 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 98.9 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 1,597 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Gaussian
  Red    : 280 meters --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 818 meters --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 2.0 kilometers --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO Q - Estudo de caso 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) – Cenário 8.

Text Summary

```
CHEMICAL DATA:
  Chemical Name: AMMONIA
  CAS Number: 7664-41-7                  Molecular Weight: 17.03 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 30 ppm   AEGL-2 (60 min): 160 ppm   AEGL-3 (60 min): 1100 ppm
  IDLH: 300 ppm      LEL: 150000 ppm     UEL: 280000 ppm
  Ambient Boiling Point: -33.4° 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: 5.5 meters/second from SW at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 10 tenths
  Air Temperature: 20° C                 Stability Class: D
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Flammable chemical escaping from tank (not burning)
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6 meters
  Tank Volume: 18.8 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 20° C
  Chemical Mass in Tank: 9,213 kilograms
  Tank is 80% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: 45 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 98.9 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 1,597 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Gaussian
  Red    : 139 meters --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 374 meters --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 904 meters --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).

ANEXO R - Estudo de caso 3: ETA Santa Bárbara - Amônia ($NH_3$) – Cenário 9.

Text Summary

```
CHEMICAL DATA:
  Chemical Name: AMMONIA
  CAS Number: 7664-41-7                    Molecular Weight: 17.03 g/mol
  AEGL-1 (60 min): 30 ppm   AEGL-2 (60 min): 160 ppm   AEGL-3 (60 min): 1100 ppm
  IDLH: 300 ppm      LEL: 150000 ppm     UEL: 280000 ppm
  Ambient Boiling Point: -33.4° 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: 6 meters/second from SW at 10 meters
  Ground Roughness: urban or forest      Cloud Cover: 10 tenths
  Air Temperature: 20° C                 Stability Class: D
  No Inversion Height                    Relative Humidity: 75%

SOURCE STRENGTH:
  Leak from hole in horizontal cylindrical tank
  Flammable chemical escaping from tank (not burning)
  Tank Diameter: 2 meters                Tank Length: 6 meters
  Tank Volume: 18.8 cubic meters
  Tank contains liquid                   Internal Temperature: 20° C
  Chemical Mass in Tank: 9,213 kilograms
  Tank is 80% full
  Circular Opening Diameter: 5 centimeters
  Opening is 2.00 meters from tank bottom
  Release Duration: 45 minutes
  Max Average Sustained Release Rate: 98.9 kilograms/min
     (averaged over a minute or more)
  Total Amount Released: 1,597 kilograms
  Note: The chemical escaped from the tank as a gas.

THREAT ZONE:
  Model Run: Gaussian
  Red    : 133 meters --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])
  Orange: 357 meters --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])
  Yellow: 862 meters --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])
```

Fonte: ALOHA 5.4.7 (2021).