



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL-SUSTANCIAS Y RESIDUOS PELIGROSOS

ESCENARIOS DE FUGA, EXPLOSIÓN E INCENDIO EN ALMACENAMIENTO DE
MATERIALES PELIGROSOS MEDIANTE SIMULACIONES COMPUTACIONALES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
I.Q. CARLA AURORA RIVERA QUIÑÓNEZ

TUTOR PRINCIPAL
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA
COMITÉ TUTOR
DR. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ, FES CUAUTITLÁN
M EN I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F., 30 DE JULIO DE 2015.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Dr. Modesto Javier Cruz Gómez**

Secretario: **Dr. Armando Aguilar Márquez**

Vocal: **Dr. Rodolfo Sosa Echeverría**

1^{er.} Suplente: **Dra. Georgina Fernández Villagómez**

2^{d o.} Suplente: **M. en I. Rodrigo T. Sepúlveda Hirose**

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Edificio de posgrado de la Facultad de Ingeniería, un sitio ubicado en Celaya, Guanajuato, México y en el Centro de Estudios del Riesgo Tecnológico (CERTEC) de la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Georgina Fernández Villagómez

FIRMA

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN	XIII
ACRÓNIMOS	XIV
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo particular	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.2.3 Alcances	3
2 ANÁLISIS DE RIESGOS	4
2.1 Historia del análisis de riesgos.....	4
2.2 Análisis de probabilidad de riesgos	5
2.3 Modelos de análisis de riesgo	10
2.3.1 Listas de verificación (Check list).....	14
2.3.2 Análisis preliminar de riesgos (PHA)	14
2.3.3 Análisis “¿Qué pasa si...?” (“What if”)	15
2.3.4 Método de modos de falla y efectos (FMEA)	15
2.3.5 Método de árbol de fallas	15
2.3.6 Método de riesgo y operatividad (HAZOP)	16
2.3.7 Índice Dow para fuego y explosiones	17
2.3.8 Índice de Mond para explosión, incendio y toxicidad	18
2.3.9 Árbol de sucesos	18
3 SIMULACIÓN DE RADIOS DE AFECTACIÓN	19
3.1 Escenarios para fuga y derrames	22
3.1.1 Emisión de gas en dos fases.....	23
3.1.2 Emisión de líquido presurizado en dos fases	24
3.1.3 Emisión de líquido refrigerado en dos fases.....	24
3.1.4 Emisión de gas en una fase	25
3.1.5 Emisión de líquido de alta volatilidad en una fase	26

3.1.6	Emisión de líquido de baja volatilidad en una fase	27
3.1.7	Emisión múltiple.....	27
3.2	Escenarios para explosión e incendio	30
3.2.1	Explosión de nube de vapor no confinada.....	31
3.2.2	Explosión por expansión de líquido en ebullición (BLEVE)	32
3.2.3	Incendios de charco (poolfire)	33
3.2.4	Dardo de fuego (jet fire).....	33
3.2.5	Bola de fuego (fireball).....	34
4	MODELOS MATEMÁTICOS PARA EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS	35
4.1	Modelos de dispersión SLAB	35
4.2	Modelo de dispersión Gaussiano	38
4.3	Ecuaciones para fuego y explosiones	40
4.3.1	BLEVE y Bola de Fuego	40
4.3.2	Incendio de charco (Pool Fire).....	42
4.3.3	Dardo de fuego (jet fire).....	45
4.3.4	Llamarada (Flash Fire)	46
4.3.5	Nubes explosivas.....	46
5	CASO ESTUDIO: ESCUELA DE CAPACITACIÓN DE BRIGADAS DE EMERGENCIA (ECBE).....	51
5.1	Descripción del sitio y ubicación geográfica.....	51
5.2	Justificación de la selección del sitio	52
5.3	Historia de ECBE	53
5.4	Estructura administrativa de ANIQ-ECBE	54
5.5	Descripción de las actividades que se realizan en el sitio.....	55
5.6	Sustancias que se manejan en el sitio	62
6	METODOLOGÍA.....	65
7	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	67
7.1	Estudios de campo.....	67
7.2	Identificación de peligros y áreas vulnerables.....	68
7.3	Análisis de datos meteorológicos.....	72
7.4	Familiarizarse con los programas: SCRI, ALOHA Y EFFECTS	82

7.5	Propuesta de escenarios por fugas de sustancias peligrosas.....	83
7.6	Análisis de consecuencias con SCRI	89
7.6.1	Llamarada por fuga de Gas L.P.....	89
7.6.2	Nube explosiva de Gas L.P.	105
7.6.3	BLEVE	108
7.6.4	Llamarada con Gasolina.....	114
7.6.5	Incendio de charco	121
7.7	Análisis de consecuencias con el programa ALOHA	125
7.8	Análisis de consecuencias con el programa EFFECTS	132
7.9	Resumen del análisis de consecuencias.....	140
7.10	Riesgo total de la instalación.....	142
7.11	Medidas de prevención	155
8	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	156
9	CONCLUSIONES.....	157
	REFERENCIAS.....	159
	ANEXOS	164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representación del árbol de fallas (INSHT, 2013).	16
Figura 3.1. Emisión de gas en dos fases (Dinámica Heurística, 2013).	23
Figura 3.2. Emisión de líquido en dos fases (Dinámica Heurística, 2013).	24
Figura 3.3. Emisión de gas en una fase (Dinámica Heurística, 2013).	26
Figura 3.4. Emisión en una fase de líquido de alta volatilidad (Dinámica Heurística, 2013).	26
Figura 3.5. Emisión en una fase líquida de baja volatilidad (Dinámica Heurística, 2013).	27
Figura 3.6. Ejemplo de escenario múltiple de emisión (Dinámica Heurística, 2013).	28
Figura 3.7. Accidente de Flixborough en 1974 (INERCO, 2013).	32
Figura 3.8. Explosión tipo BLEVE (INERCO, 2013).	32
Figura 3.9. Típico escenario de incendio de charco (INERCO, 2013).	33
Figura 3.10. Escena de un dardo de fuego (Dinámica Heurística, 2013).	34
Figura 3.11. Bola de fuego de BLEVE (INERCO, 2013).	34
Figura 4.1. Esquema de dispersión de una nube de gas denso estudiada por el modelo SLAB (Ermak, 1990).	37
Figura 5.1. Ubicación geográfica de Celaya, Guanajuato (SEGOB , 2010).	51
Figura 5.2. Organigrama ANIQ-ECBE (Morales, 2014).	55
Figura 5.3. Equipo de protección personal para operaciones contra incendio.	57
Figura 5.4. Proyecto árbol de navidad y bridas.	57
Figura 5.5. Proyecto torre de destilación.	58
Figura 5.6. Proyecto puente de carga.	58
Figura 5.7. Proyecto fosa de drenaje.	59
Figura 5.8. Proyecto Casa de Humo.	59
Figura 5.9. Actividades de rescate.	60
Figura 5.10. Equipo de protección personal para control de emergencias con materiales peligrosos.	61
Figura 5.11. Proyecto de control de fugas en intercambiadores de calor.	61
Figura 5.12. Actividades de primeros auxilios.	62
Figura 6.1. Metodología para la simulación de radios de afectación.	66
Figura 7.1. Delimitación de la zona de estudio.	67
Figura 7.2. Mapa externo de identificación de áreas vulnerables.	72
Figura 7.3. Temperatura máxima y mínima en primavera.	74
Figura 7.4. Humedad relativa mínima y máxima en primavera.	74
Figura 7.5. Velocidad y dirección del viento en primavera.	75
Figura 7.6. Temperatura máxima y mínima en verano.	76
Figura 7.7. Humedad relativa mínima y máxima en verano.	76
Figura 7.8. Velocidad y dirección del viento en verano.	77
Figura 7.9. Temperatura máxima y mínima en otoño.	78

Figura 7.10. Humedad relativa máxima y mínima en otoño.	78
Figura 7.11. Velocidad y dirección del viento en otoño.	79
Figura 7.12. Temperatura máxima y mínima en invierno.	80
Figura 7.13. Humedad máxima y mínima en invierno.	80
Figura 7.14. Velocidad y dirección del viento en invierno.....	81
Figura 7.15. Árbol de sucesos con suceso iniciador de una fuga instantánea líquido/aerosol de Gas L.P.	86
Figura 7.16. Árbol de sucesos con suceso iniciador de una fuga de Gasolina y Diesel.	87
Figura 7.17. Concentración en la dirección del viento en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ para cada escenario meteorológico, por fuga desde el espacio de vapor.....	92
Figura 7.18. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en verano, por fuga desde el espacio de vapor.	93
Figura 7.19. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en otoño, por fuga desde el espacio de vapor.	93
Figura 7.20. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en invierno, por fuga desde el espacio de vapor.....	94
Figura 7.21. Concentración en la dirección del viento en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ para cada escenario meteorológico, por fuga desde el espacio de vapor.....	95
Figura 7.22. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en verano, por fuga desde el espacio de vapor.	96
Figura 7.23. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en otoño, por fuga desde el espacio de vapor.	97
Figura 7.24. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en Invierno, por fuga desde el espacio de vapor.	97
Figura 7.25. Concentración en la dirección del viento en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ para cada escenario meteorológico, por fuga desde el espacio del líquido.	100
Figura 7.26. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en primavera, por fuga desde el espacio del líquido.	100
Figura 7.27. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en verano, por fuga desde el espacio del líquido.	101
Figura 7.28. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en otoño, por fuga desde el espacio del líquido.....	101
Figura 7.29. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en Invierno, por fuga desde el espacio del líquido.	102
Figura 7.30. Concentración en la dirección del viento en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ para cada escenario meteorológico, por fuga desde el espacio del líquido.	103
Figura 7.31. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en primavera, por fuga desde el espacio del líquido.	103
Figura 7.32. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en verano, por fuga desde el espacio del líquido.	104

Figura 7.33. Área inflamable en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$ en otoño, por fuga desde el espacio del líquido.....	104
Figura 7.34. Área inflamable en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$ en invierno, por fuga desde el espacio del líquido.....	105
Figura 7.35. Radios de afectación por nube explosiva de Gas L.P.	107
Figura 7.36. Dosis de radiación generada por la bola de fuego, en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ para todas las estaciones.....	109
Figura 7.37. Radios de afectación por radiación de la bola de fuego en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$	109
Figura 7.38. Dosis de radiación generada por la explosión tipo BLEVE del tanque de Gas L.P., en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$ para todas las estaciones.	110
Figura 7.39. Radios de afectación por radiación de la bola de fuego en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$	111
Figura 7.40. Sobrepresión generada en la explosión del tanque de gas licuado de petróleo.	112
Figura 7.41. Radios de afectación por sobrepresión generada en la explosión del tanque de gas licuado de petróleo.	113
Figura 7.42. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ en primavera.	116
Figura 7.43. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ en verano.	117
Figura 7.44. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ en otoño.	117
Figura 7.45. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ en invierno.....	118
Figura 7.46. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ en primavera.	119
Figura 7.47. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ en verano.	119
Figura 7.48. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ en otoño.	120
Figura 7.49. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ en invierno.....	120
Figura 7.50. Radiación generada por el incendio de charco en distancias a nivel de piso, en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$ para todas las estaciones.....	122
Figura 7.51. Radios de afectación por radiación del incendio de charco en condiciones de $T_{m\acute{i}n}$ y $H_{Rm\acute{a}x}$	123
Figura 7.52. Radiación generada por el incendio de charco en distancias a nivel de piso, en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$ para todas las estaciones.....	124
Figura 7.53. Radios de afectación por radiación del incendio de charco en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$	124

Figura 7.54. Área inflamable de la llamarada con Gas L.P. por fuga desde el espacio del líquido, utilizando el programa ALOHA.....	126
Figura 7.55. Radios de afectación por nube explosiva utilizando el programa ALOHA.	127
Figura 7.56. Radios de afectación por radiación generada por la bola de fuego, utilizando el programa ALOHA.	128
Figura 7.57. Radios de afectación por la sobrepresión generada en la explosión BLEVE utilizando el programa ALOHA.	129
Figura 7.58. Radios de afectación por radiación generada en el incendio de charco, utilizando el programa ALOHA.	131
Figura 7.59. Concentración contra distancia viento abajo de la dispersión de nube de Gas L.P. utilizando el programa EFFECTS.	132
Figura 7.60. Área inflamable por llamarada de Gas L.P. utilizando el programa EFFECTS.....	133
Figura 7.61. Radios de afectación por nube explosiva de Gas L.P., utilizando el programa EFFECTS.....	134
Figura 7.62. Radiación contra distancia por bola de fuego, utilizando el programa EFFECTS.....	135
Figura 7.63. Radios de afectación por radiación generada por la bola de fuego, utilizando el programa EFFECTS.....	136
Figura 7.64. Radios de afectación por la sobrepresión generada en la explosión BLEVE utilizando el programa EFFECTS.	137
Figura 7.65. Concentración contra distancia viento abajo de la dispersión de vapores de gasolina como consecuencia de la evaporación del charco utilizando el programa EFFECTS.....	138
Figura 7.66. Radios de afectación por radiación generada en el incendio de charco, utilizando el programa EFFECTS.....	139
Figura 7.67. Resultados de confiabilidad de diversos modelos de simulación para emisiones continuas (Ortega, 2009).	141
Figura 7.68. Resultados de confiabilidad de diversos modelos de simulación para emisiones instantáneas (Ortega, 2009).....	142
Figura 7.69. Contornos de riesgo total individual de la instalación.....	154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Probabilidad de ocurrencia de eventos.	7
Tabla 2.2. Consecuencias para la vida y la salud.	8
Tabla 2.3. Velocidad de propagación.	9
Tabla 2.4. Consecuencias al medio ambiente.	9
Tabla 2.5. Consecuencias para la propiedad.	9
Tabla 3.1. Programas computacionales comúnmente utilizados para el análisis de consecuencias.	20
Tabla 3.2. Clases de emisión posibles como resultado de condiciones típicas de almacenamiento.	29
Tabla 4.1. Categorías de estabilidad atmosférica.	39
Tabla 4.2. Clasificaciones de estabilidad atmosférica.	40
Tabla 4.3. Criterios de lesiones por quemadura debido a la radiación térmica.	45
Tabla 4.4. Estimado de daños por sobrepresión en explosiones.	50
Tabla 5.1. Datos meteorológicos.	52
Tabla 7.1. Clase de riesgo de las sustancias que se manejan en el sitio.	68
Tabla 7.2. Capacidad máxima y porcentaje de llenado de los tanques que almacenan combustible en el sitio de estudio.	68
Tabla 7.3. Propiedades fisicoquímicas, características de inflamabilidad y rombo de identificación de las sustancias peligrosas utilizadas en el sitio.	69
Tabla 7.4. Criterios de clasificación de riesgo según la NOM-018-STPS-2000.	70
Tabla 7.5. Análisis Preliminar de Peligros en el almacén de combustibles.	71
Tabla 7.6. Caracterización climática en cada estación del año en Celaya, Gto.	82
Tabla 7.7. Frecuencias de los sucesos iniciadores para el árbol de sucesos.	85
Tabla 7.8. Valores de probabilidad para los factores condicionantes.	85
Tabla 7.9. Estimación de frecuencias de los escenarios accidentales.	88
Tabla 7.10. Datos para la simulación de la llamada por fuga de Gas L.P desde el espacio de vapor.	91
Tabla 7.11. Escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$	91
Tabla 7.12. Distancias máximas de afectación por llamada de Gas L.P. en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$, por fuga desde el espacio de vapor.	94
Tabla 7.13. Escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$	95
Tabla 7.14. Distancias máximas de afectación por llamada de Gas L.P. en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$, por fuga desde el espacio de vapor.	98
Tabla 7.15. Datos para la simulación de la fuga de Gas L.P desde el espacio del líquido.	99

Tabla 7.16. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gas L.P. en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$, por fuga desde el espacio del líquido.	102
Tabla 7.17. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gas L.P. en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$, por fuga desde el espacio del líquido.	105
Tabla 7.18. Distancias de afectación por sobrepresión generada en la nube explosiva de Gas L.P.	107
Tabla 7.19. Datos de entrada al programa para la simulación de la radiación generada por la bola de fuego.....	108
Tabla 7.20. Radiación y dosis en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$	110
Tabla 7.21. Radiación y dosis en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$	111
Tabla 7.22. Datos para la simulación de la sobrepresión generada en la explosión tipo BLEVE.....	112
Tabla 7.23. Distancias de afectación por sobrepresión.....	113
Tabla 7.24. Resultados de la simulación de sobrepresión por nube explosiva de Gas L.P.....	114
Tabla 7.25. Datos para la simulación de la llamarada con Gasolina.....	116
Tabla 7.26. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$	118
Tabla 7.27. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$	121
Tabla 7.28. Datos para la simulación del incendio de charco.....	121
Tabla 7.29. Radiación a nivel de piso, generada por el incendio de charco en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$	123
Tabla 7.30. Radiación a nivel de piso, generada por el incendio de charco en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$	125
Tabla 7.31. Distancias de afectación por sobrepresión generada por la nube explosiva de Gas L.P., dadas por el programa ALOHA.	127
Tabla 7.32. Distancias de afectación por radiación generada por la bola de fuego, dadas por el programa ALOHA.	129
Tabla 7.33. Distancias de afectación por sobrepresión dadas por el programa ALOHA.	130
Tabla 7.34. Distancias de afectación por radiación generada en el incendio de charco, dadas por el programa ALOHA.	131
Tabla 7.35. Distancias de afectación por sobrepresión dadas por el programa EFFECTS.....	134
Tabla 7.36. Distancias de afectación por radiación generada por la bola de fuego, dadas por el programa EFFECTS.	136
Tabla 7.37. Distancias de afectación por sobrepresión dadas por el programa EFFECTS.....	137
Tabla 7.38. Distancias de afectación por radiación generada en el incendio de charco, dadas por el programa EFFECTS.....	139

Tabla 7.39. Distancias máximas de afectación para cada escenario accidental, obtenidas con los programas SCRI, ALOHA y EFFECTS.....	140
Tabla 7.40. Ecuaciones Probit para el cálculo de vulnerabilidad.....	144
Tabla 7.41. Frecuencias de los escenarios accidentales por efecto dominó.....	153
Tabla 7.42. Criterios de tolerancia de riesgo individual.	155
Tabla 8.1. Zonas de amortiguamiento para los escenarios críticos evaluados.	156

RESUMEN

El manejo de sustancias peligrosas en sitios donde se desarrollan actividades o productos para mejorar las condiciones de vida de la humanidad, ha ocasionado que en alguna de las etapas del manejo se desencadenen accidentes, los cuales se han presentado con gran impacto en diversas partes del mundo. El objetivo de este proyecto es plantear escenarios de fuga, explosión e incendio en almacenamiento de materiales peligrosos mediante el empleo de programas computacionales para el análisis de consecuencias que nos permiten conocer las áreas de afectación que se tendrían en caso de algún accidente y así tomar decisiones en cuanto a las zonas de amortiguamiento para el resguardo de la población circundante. El proyecto se realizó bajo la metodología que consiste en: efectuar estudios de campo, identificar peligros y áreas vulnerables, analizar los datos meteorológicos de la zona, familiarizarse con los diferentes software (SCRI, ALOHA y EFFECTS), analizar las frecuencias y consecuencias de los escenarios accidentales, medir el nivel de riesgo de la instalación y proporcionar medidas de prevención atendiendo a los escenarios estudiados. Los escenarios accidentales se obtuvieron a partir de árboles de sucesos considerando las sustancias involucradas en el estudio (Gasolina, Diésel y Gas L.P.), y éstos fueron: BLEVE, nube explosiva, incendio de charco y llamarada. Al realizar las simulaciones en los diferentes escenarios meteorológicos con el programa SCRI, se encontró que la radiación generada en dichos escenarios no varía entre cada estación, sin embargo, existe una ligera diferencia en distancias de afectación empleando condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima. Las mayores distancias de afectación en cuanto a dispersión de las sustancias en el aire, se obtuvieron en condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima en la estación de invierno. Dicha condición fue utilizada para efectuar simulaciones de los escenarios accidentales con los programas ALOHA y EFFECTS. Comparando los modelos matemáticos empleados por los paquetes informáticos, se concluyó que el programa SCRI genera resultados confiables y las distancias de afectación obtenidas permitieron identificar que los daños por sobrepresión y radiación generados por la BLEVE resultaron en distancias mayores en comparación con los demás escenarios estudiados, encontrando que los tanques de almacenamiento de hidrocarburo líquido pueden verse afectados por una sobrepresión de 83 kPa, ocasionando así un posible efecto dominó. Así mismo, la radiación generada en el incendio de charco puede afectar al tanque de Gas L.P. con una radiación de 19.5 kW/m². Se calculó la probabilidad de afectación a los tanques de almacenamiento, misma que permitió calcular la frecuencia de eventos secundarios, lo cual fue importante pues este hecho puede incrementar el riesgo en el sitio. Teniendo las frecuencias y consecuencias de los escenarios se procedió a determinar el nivel de riesgo empleando el programa Risk Curves, con lo que se obtuvo un nivel de riesgo aceptable para la instalación estudiada.

ACRÓNIMOS

ALOHA	Areal Locations Of Hazardous Atmospheres (Localización de zonas de atmósferas peligrosas)
ANIQ	Asociación Nacional de la Industria Química
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (Explosión por expansión de líquido en ebullición)
CANARY	Nombre del programa de análisis de consecuencias desarrollado por Quest.
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica
DEGADIS	Dense Gas Dispersion Model (Modelo de dispersión de gas denso)
DGPC	Dirección General de Protección Civil
ECBE	Escuela de Capacitación de Brigadas de Emergencia
EFFECTS	Nombre del programa de análisis de consecuencias desarrollado por TNO.
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
FMEA	Failure Mode Effect Analysis (Análisis de Modo de Falla y Efectos)
FRED	Nombre de programa de análisis de consecuencias desarrollado por SHELL.
HAZOP	Hazard and Operability (Riesgo y Operatividad)
HEGADAS	Modelo de dispersión de gas denso para fuentes de área
ICIQ	Instituto para la Competitividad de la Industria Química
INSHT	Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo
PCE	Protección Civil de España
PHA	Preliminary Hazard Analysis (Análisis Preliminar de Peligro)
SCRI	Simulación de Contaminación y Riesgos en la Industria
SLAB	Modelo de dispersión de gas denso
TNO	The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (Organización Holandesa para la investigación científica aplicada)
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion (Explosión de nube de vapor no confinada)

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico a nivel mundial demanda el uso de una gran diversidad de materiales y sustancias químicas que son utilizadas para el desarrollo de nuevos productos, contribuyendo a aumentar la expectativa de vida y mejorar las condiciones de la existencia humana, e involucrando en el proceso de producción el almacenamiento y transporte de sustancias que pueden ser peligrosas debido a las características intrínsecas de las mismas, ya que pueden ser inflamables, reactivas, explosivas o tóxicas (CENAPRED , 2003).

La manipulación de los productos químicos, provenientes de la industrialización, puede estar acompañada de la liberación no controlada, incendio o explosión de éstos provocando graves consecuencias traducidas en grandes pérdidas humanas, impactos al medio ambiente y pérdidas económicas. Las principales causas de los accidentes industriales han sido el mal manejo de las sustancias, falta de mantenimiento de los equipos utilizados, fallas operativas en los procesos, errores humanos, fallas mecánicas e incluso causas premeditadas.

A pesar de que las prácticas en la industria han estado regidas por la normatividad nacional existente y por los lineamientos internacionales de seguridad para el correcto manejo de sustancias químicas, los accidentes han estado presentes en la mayor parte del planeta.

A nivel mundial se han registrado importantes accidentes que han afectado la salud de poblaciones enteras, como es el caso de la catástrofe en la central nuclear de Chernóbil en Ucrania el 26 de abril de 1986 (CNEA, 2007), donde una serie de factores como la carencia de percepción del peligro y una falta de cultura de la seguridad en el personal de la planta, tuvieron como consecuencia el emprendimiento de acciones potencialmente peligrosas que originaron la explosión del reactor en la planta, liberando sustancias radiactivas, cuya pluma formada por humo se elevó y se dispersó cientos de metros abarcando radios de afectación sobre el área de población dejando serias afectaciones en la salud de sus residentes hasta quedar inhabitable la región.

Otro ejemplo de desastres industriales, pero en este caso, a nivel nacional es el de San Juan Ixhuatpec de 1984, donde se desencadenaron una serie de explosiones ocurridas en la planta de almacenamiento y distribución de Petróleos Mexicanos (PEMEX), debido al sobrellenado de los depósitos de combustible y la falta de funcionamiento de las válvulas de alivio, lo cual ocasionó la formación de una gran nube de vapor inflamable cuya explosión provocó la muerte de entre 500 y 600

personas, un aproximado de 2,000 heridos y la destrucción de viviendas aledañas (Díaz, 2006).

Debido a la ocurrencia de innumerables eventos catastróficos en las industrias, el hombre se ha preocupado cada vez más por el desarrollo de técnicas computacionales que ayuden a identificar los posibles radios de afectación y así poder implementar medidas de seguridad en caso de que ocurra un accidente o para evitarlos en medida de lo posible.

De lo anterior, radica la importancia de utilizar programas computacionales que ayuden a predecir los escenarios de afectación debido a posibles accidentes, proporcionándole información sobre las características del medio, propiedades fisicoquímicas de las sustancias presentes, así como los procesos utilizados. Como es el caso de SCRI-MODELOS, que “es un conjunto de herramientas, para simular en computadora; emisiones de contaminantes, fugas y derrames de productos tóxicos y/o inflamables y daños por nubes explosivas, para estimar escenarios de afectación por emisiones continuas o instantáneas, bajo diversas condiciones meteorológicas” (CENAPRED, 2006).

1.1 Justificación

Las industrias requieren de diversas sustancias químicas para llevar a cabo sus procesos productivos involucrando la producción, almacenamiento y transporte de éstas, por lo que es muy probable que ocurra un derrame o fuga en alguna de las etapas, y consecuentemente, un accidente que puede afectar a los trabajadores, a la población circundante, al ambiente y a la industria.

Por lo cual, es indispensable que las actividades en la industria se realicen de manera segura, en este caso es de gran importancia el poder estimar los radios de afectación por la ocurrencia de algún evento que tenga como consecuencia una liberación no controlada de sustancias peligrosas o la presencia de un incendio o explosión, siendo importante conocer las propiedades y características de las sustancias y materiales que se utilizan así como considerar el personal que está expuesto y las características de las instalaciones y procesos existentes, con el fin de proporcionar medidas para prevenir y en su caso, mitigar el impacto de cualquier accidente.

En la actualidad existen diferentes tipos de programas de análisis de consecuencias que facilitan la tarea de determinar los radios de afectación para tomar decisiones en cuanto a las medidas que se deben considerar en caso de presentarse un accidente causado por fallas técnicas o errores de recursos humanos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo particular

- Plantear escenarios de fuga, explosión e incendio en almacenamiento de materiales peligrosos mediante simulaciones computacionales en un sitio previamente seleccionado.

1.2.2 Objetivos específicos

- Seleccionar el sitio para la determinación de los radios de afectación por fuga, explosión e incendio de materiales peligrosos.
- Conocer el uso de los programas de análisis de consecuencias para su posterior aplicación con materiales peligrosos presentes en el sitio seleccionado.
- Determinar los radios de afectación por fuga, explosión e incendio de materiales peligrosos en el sitio seleccionado.
- Proporcionar las medidas de prevención adecuadas a los escenarios estudiados, considerando el mantenimiento de las instalaciones eléctricas, condiciones mecánicas de los tanques y el grado de capacitación del personal.

1.2.3 Alcances

El presente proyecto de tesis pretende plantear los diferentes escenarios accidentales que se pueden tener en el almacenamiento de materiales peligrosos conociendo las magnitudes de éstos mediante simulaciones computacionales. El estudio incluye:

- El empleo de los programas: SCRI- Modelos y Fuego, ALOHA y EFFECTS.
- Las sustancias peligrosas involucradas en el estudio son: Gasolina, Diesel y Gas L.P.
- Los escenarios accidentales a simular serán por fuga, explosión e incendio.
- En el análisis de consecuencias se simularán dichos escenarios accidentales con el programa SCRI en sus versiones Modelos y Fuego, considerando ocho escenarios meteorológicos.
- Las condiciones meteorológicas que resulten en consecuencias mayores para cada escenario accidental, serán utilizadas para simular con los programas ALOHA y EFFECTS.
- Se determinará el riesgo total de la instalación mediante el programa Risk Curves.

2 ANÁLISIS DE RIESGOS

2.1 Historia del análisis de riesgos

Desde la antigüedad, las actividades del hombre han estado fuertemente unidas a la posibilidad de que salgan mal y resulten en una catástrofe, afectando a la población e instalaciones, y medio ambiente. Es por ello que se puede decir que el riesgo es inherente a la actividad humana. En sus principios, la preocupación del hombre ante la posibilidad de falla en sus procesos no era precisamente la seguridad de sus trabajadores ni mucho menos la del ambiente. Si un Rey cuidaba de los habitantes de su pueblo no era porque se preocupara por su bienestar sino porque ellos eran parte de su propiedad, así es como la salud pública se volvió una prioridad con las grandes epidemias de los antepasados (Fullwood, et al., 2000).

Al inicio de los tiempos, para generar energía se utilizaban fuentes naturales como el viento, éstas eran fuentes poco riesgosas y bien conocidas por la humanidad, posteriormente llegó la primera máquina de vapor, la cual trabajaba mediante un proceso más sofisticado, sin embargo, con los descubrimientos de Carnot, se comenzó a emplear vapor a mayor presión y temperatura. Los primeros generadores de vapor no contaban con las medidas de seguridad con los que cuentan los calentadores de hoy en día, anteriormente eran tanques a alta presión que por su simplicidad eran extremadamente propensos a una catástrofe (Fullwood, et al., 2000). Este avance aunque significó riesgos más grandes fue de gran importancia para el desarrollo de la humanidad, gracias a las máquinas de vapor, transporte ferroviario, aéreo y terrestre, alcanzaron una velocidad y eficiencia que en el pasado hubiera sido casi imposible concebir.

Con la revolución industrial, se incrementó la introducción de tecnologías para desarrollar nuevos procesos de producción y la productividad de empresas, y con ello el nivel de riesgo propio de la operación (Lees, 2005). Como consecuencia, surge la necesidad de implementar medidas de seguridad que minimicen los riesgos intrínsecos de la actividad industrial.

En las últimas tres décadas el interés por encontrar la forma para evitar o minimizar los riesgos en las actividades humanas ha tomado gran fuerza. Esto se debe a la evolución de los procesos industriales por la necesidad del hombre de crear nuevos productos que faciliten la vida cotidiana. Debido a esto, los riesgos en la industria aumentaron sensiblemente, y gracias a accidentes que se han presentado a nivel mundial, se han redoblado esfuerzos para predecir lo que pudiera salir mal antes de que provoque un accidente, lo cual es el principal objetivo del análisis de riesgos (Rodríguez, 2009).

Desde los años setenta, los gobiernos de países industrializados empezaron a sensibilizarse sobre temas relacionados con el ambiente y la seguridad, por las nubes tóxicas emanadas por el accidente de Seveso en Italia (1977), la explosión del reactor nuclear en Chernóbil (1986), las fatales consecuencias por los residuos tóxicos arrojados al Love Canal en Estados Unidos (1977) (Rodríguez, 2009), etc. El impacto sobre las poblaciones y el medio ambiente se tradujeron en grandes pérdidas, surgiendo las primeras manifestaciones de la conciencia de seguridad, implementando los análisis de riesgo en el sector industrial.

2.2 Análisis de probabilidad de riesgos

La evaluación de los diversos riesgos asociados a una determinada acción en un sistema mediante el análisis de riesgos, está orientado a la determinación de los siguientes aspectos (Casal, et al., 1999):

- Accidentes que pueden ocurrir.
- Frecuencia de estos accidentes.
- Magnitud de sus consecuencias.

De allí que se pueda definir el análisis de probabilidad de riesgos como un proceso de estimación basado en la ocurrencia de eventos que pueden causar daños al personal, a las instalaciones y a las comunidades (CENAPRED, 2001). El resultado de un análisis de este tipo, es la posibilidad de decidir cómo operar con la finalidad de mantener el sistema dentro de los límites previamente establecidos. Pero esta decisión no puede desligarse del tipo de consecuencia que se puede desencadenar de dicho evento.

Por lo anterior, se puede decir que el riesgo es una función de las variables de probabilidad y consecuencia, definiéndolo como la probabilidad de que ocurra un accidente y se expresa matemáticamente con la siguiente expresión (Gordillo, 2000):

$$R = f(P, M) \quad (2.1)$$

Donde:

R: Riesgo de que ocurra un evento

P: Probabilidad de que se verifique un evento

M: Gravedad de las consecuencias o, simplemente, magnitud de las consecuencias del evento

Para evaluar el riesgo utilizando la expresión anterior (ecuación 2.1) es necesario desarrollar tres actividades de investigación. Primero emplear métodos de análisis de riesgos de tipo cualitativo (check list, FMEA, HAZOP, etc.) para identificar los errores de funcionamiento que provocan consecuencias indeseables. Después, estimar mediante árboles lógicos la probabilidad de ocurrencia, usando los mal funcionamientos que causan consecuencias indeseables. Y por último, determinar la probabilidad para la misma serie de consecuencias (Gordillo, 2000).

Las actividades se deben realizar utilizando métodos que ayuden a describir el desarrollo de fenómenos físicos, de tipo simples o complejos. De estos análisis se obtienen series de datos probabilidad-consecuencia, los cuales representan la mejor estimación del riesgo asociado a un suceso determinado.

El riesgo esperado del evento es el producto de la probabilidad de ocurrencia por la consecuencia esperada (Gordillo, 2000):

$$(Probabilidad\ de\ ocurrencia) \times (Consecuencia\ del\ evento) \quad (2.2)$$

La consecuencia de una acción que puede generar diversos resultados, se estima mediante la suma algebraica de los productos de cada resultado posible por su probabilidad.

Ahora bien, como en la mayoría de los casos, la probabilidad de que se verifique un evento debe ser calculado dentro de un intervalo de tiempo especificado, la ecuación 2.1 se puede expresar de la siguiente forma (CENAPRED, 2001):

$$R = f(F, M) \quad (2.3)$$

Donde:

F: Probabilidad de que ocurra un evento dentro de un intervalo de tiempo prefijado.

Por un enfoque dimensional, la variable F es expresada como el inverso del tiempo, de allí que se le denomine como frecuencia.

Para analizar el riesgo tecnológico, los estudios de riesgo de seguridad de una planta deben tomar en cuenta para cada evento no deseado, la cuantificación de las consecuencias (magnitud, M) y la estimación de su probabilidad de ocurrencia (P). Así pues, el valor calculado de R con la expresión 2.2 es el valor esperado de la pérdida (Gordillo, 2000).

Tomando en cuenta que la probabilidad de que ocurra un evento está referida a un intervalo de tiempo, la expresión 2.2 se modifica quedando de la siguiente manera (Gordillo, 2000):

$$R = F * M \quad (2.4)$$

Donde:

R: Riesgo tecnológico

F: Frecuencia

M: Magnitud

La probabilidad de ocurrencia de algún evento en un intervalo de tiempo, se puede clasificar como se muestra en la tabla 2.1, en una escala del 1 al 5, donde 1 es “improbable” y el otro extremo “muy probable”.

Tabla 2.1. Probabilidad de ocurrencia de eventos.

Clase	Características
1.Improbable	Menos de uno en cada 1000 años
2.	Uno entre 100 y 1000 años
3.Poco probable	Uno entre 10 y 100 años
4.	Uno entre 1 y 10 años
5.Muy probable	Más de uno por año

Fuente: (CENAPRED, 2001).

El alcance de las consecuencias de explosiones, difusión de nubes tóxicas o inflamables, e incendios, se expresan en términos del número de muertos, lesionados o evacuados, daños a las instalaciones y al medio ambiente, así como la predicción de los efectos a largo plazo, tales como daños por radiación, quemaduras o efectos crónicos por intoxicación (Casal, et al., 1999).

La magnitud de las consecuencias provocadas por un evento no deseable se puede estimar en una escala del 1 al 5, de acuerdo a los efectos en el ser humano, al ambiente, a la propiedad y a la velocidad con que se difunden estos efectos, tal como lo muestra la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Consecuencias para la vida y la salud.

Clase	Características
1.Poco importante	Incomodidad temporal.
2.Limitado	Pocos lesionados, incomodidades por un tiempo prolongado.
3.Grave	Lesionados e incomodidades graves.
4.Muy grave	5-20 decesos, 20-100 heridos graves y hasta 500 personas evacuadas.
5.Catastrófico	Más de 20 decesos, cientos de heridos graves y más de 500 personas evacuadas.

Fuente: (Zagal, 1996).

En la evaluación de riesgo a la salud se involucran dos aspectos importantes como son la severidad del evento (peligro) y la exposición al mismo, y se expresa mediante la siguiente ecuación (CENAPRED, 2001):

$$\text{Riesgo} = \text{Severidad del evento} * \text{Exposición} \quad (2.5)$$

Para evaluar el riesgo a la salud humana se necesita conocer la probabilidad de las consecuencias indeseables a la población debido a las perturbaciones en el ambiente y para ello se utilizan herramientas científicas, estadísticas y la modelación que permitan analizar información referente al riesgo. Así mismo, hay que considerar los siguientes elementos para su evaluación (CENAPRED, 2001):

- Identificación del peligro
- Evaluación de la toxicidad
- Evaluación de la exposición, y
- Caracterización del riesgo

El manejo de sustancias químicas en los procesos industriales, no es una situación extraña, y se sabe que es una actividad que implica un riesgo severo, el cual se puede evaluar determinando la probabilidad de consecuencias adversas a la salud ocasionadas por la presencia de sustancias químicas, considerando que varios contaminantes, desencadenados de la consecuencia, se pueden encontrar simultáneamente, por múltiples rutas de exposición, en el aire, suelo y en productos alimenticios. Para caracterizar este riesgo es importante identificar qué poblaciones están expuestas y medir el riesgo que implica la presencia de estas sustancias, dependiendo de la concentración y las propiedades fisicoquímicas de éstas, en las comunidades receptoras (Casal, et al., 1999). Así entonces, el riesgo que causa ésta actividad se estima mediante la evaluación de la toxicidad y exposición, y caracterización del riesgo.

Las consecuencias que se derivan de las actividades industriales por el manejo de sustancias químicas, pueden tener repercusiones, como ya se había mencionado, tanto en la población y el medio ambiente como en las instalaciones. La velocidad de propagación, las consecuencias al medio ambiente y los daños a la propiedad, se pueden identificar, dependiendo de la gravedad, en las tablas 2.3, 2.4 y 2.5, respectivamente.

Tabla 2.3. Velocidad de propagación.

Clase	Características
1. Se manifiesta clara y rápidamente (daños visibles en forma inmediata).	Efectos localizados y sin daños
2. Medianamente	Con alguna propagación y pequeños daños
3. No hay señales	Efectos con propagación rápida y efectos inmediatos (explosión)

Fuente: (Zagal, 1996).

Tabla 2.4. Consecuencias al medio ambiente.

Clase	Características
1. Poco importante	Efectos localizados, sin contaminación
2. Limitado	Efectos localizados, con contaminación simple
3. Grave	Los efectos se propagan con contaminación simple.
4. Muy grave	Efectos localizados con contaminación intensa
5. Catastrófico	Los efectos se propagan con contaminación muy intensa

Fuente: (Zagal, 1996).

Tabla 2.5. Consecuencias para la propiedad.

Clase	Características
1. Poco importante	Menos de 0.5
2. Limitado	Mayor a 0.5 y menor o igual a 1.0
3. Grave	Mayor a 1.0 y menor o igual a 5.0
4. Muy grave	Mayor a 5.0 y menor o igual a 20
5. Catastrófico	Más de 20

Fuente: (Zagal, 1996).

Todos los procesos industriales implican actividades altamente riesgosas que pueden presentar diversos acontecimientos que son potencialmente peligrosos, caracterizados por una magnitud (m_i) y una frecuencia estimada (f_i), con lo cual se puede estimar el riesgo total de la planta, observando que éste será la suma de los riesgos de todos los eventos, resultando la siguiente expresión matemática (Gordillo, 2000):

$$R = \sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n m_i * f_i = \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i * f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \right] = M * F \quad (2.6)$$

Donde:

R: Riesgo total de la planta

R_i : Riesgo del evento i-ésimo

M_i : Magnitud del evento i-ésimo

F_i : Frecuencia del evento i-ésimo

F: Frecuencia total

M: Magnitud total

La expresión anterior es utilizada cuando se cuenta con diversos eventos que tienen la misma magnitud y frecuencia, utilizando una función matemática del tiempo $F=F(M)$ y así calcular la frecuencia acumulada de dichos eventos (CENAPRED, 2001).

Como se mencionó al inicio del capítulo, para evaluar el riesgo e implementar las expresiones estudiadas, se deben utilizar métodos de análisis de riesgo de tipo cuantitativo y cualitativo, mismos que son objeto de estudio de los modelos de análisis de riesgo que serán estudiados con más detalle en las siguientes secciones.

2.3 Modelos de análisis de riesgo

Un análisis de riesgo se lleva a cabo proporcionando respuestas a las siguientes preguntas: ¿qué puede salir mal?, ¿cuál es la probabilidad de que eso ocurra?, ¿cuáles son las consecuencias?, desarrollándose en tres etapas principales (Rausand, 2011):

- Identificación de peligros. En esta etapa, los riesgos y las amenazas relacionadas con el sistema son identificados junto con los eventos peligrosos potenciales. También se identifican los activos que pueden ser dañados.
- Análisis de frecuencia. Este paso se suele implicar un análisis deductivo para identificar las causas de cada evento peligroso y estimar la frecuencia del evento peligroso en base a datos de la experiencia y /o dictámenes de expertos.

- Análisis de consecuencias. Aquí, se lleva a cabo un análisis inductivo para identificar todas las consecuencias posibles que pueden surgir de eventos peligrosos, así como su probabilidad de ocurrencia.

En las instalaciones industriales, el análisis de riesgo demanda la consideración de todas las variables importantes que condicionan la operación de los procesos que en ellas se llevan a cabo, por lo que debe plantearse la probabilidad de las posibles variaciones o fallas que pueden ocurrir, y determinar las consecuencias de eventos generados, para desarrollar un plan de emergencia que incluya la capacidad de respuesta de la instalación. Por lo tanto, los objetivos y metodología para adaptar un análisis de riesgos deben ser examinados en el contexto de un plan global de operación (CENAPRED, 2001).

La experiencia de los accidentes sucedidos en las instalaciones de procesos industriales demuestra que las causas de los mismos pueden clasificarse excluyendo agentes externos al proceso y causas naturales (proximidad a las instalaciones peligrosas, viento, heladas, incendios, etc.), en los siguientes tres grupos, para cada uno de los cuales se indica una de las fallas que se presentan con mayor frecuencia (Gordillo, 2000):

a) Falla de componentes.

- ❖ Diseño inadecuado frente a la presión interna fuerzas externas, corrosión de los materiales y temperatura.
- ❖ Fallas de los elementos como bombas, compresores, ventiladores, agitadores, etc.
- ❖ Fallas en el sistema de control (sensores de presión, temperatura, controles de nivel, reguladores de flujos, unidades de control, etc.).
- ❖ Fallas de sistemas específicos de seguridad (válvulas, discos de ruptura, sistema de alivio de presión, sistemas de neutralización, alarmas, etc.).
- ❖ Fallas de juntas, bridas y conexiones.

b) Desviación de las condiciones normales de operación.

- ❖ Alteraciones incontroladas de los parámetros fundamentales del proceso (presión, temperatura, flujo y/o concentración).
- ❖ Fallas en los servicios tales como:
 - Insuficiencia en el agua de enfriamiento para las reacciones exotérmicas.
 - Insuficiente aporte del medio de calentamiento.

- Corte del suministro eléctrico.
- Ausencia del agente inertizante.
- Ausencia de aire comprimido (de instrumentación o de agitación).
- ❖ Fallas en los procedimientos de paro y arranque
- ❖ Errores en la adición manual de materiales químicos.
- ❖ Formación de subproductos, residuos o impurezas, causantes de reacciones secundarias.

c) Errores humanos y de organización

- ❖ Errores de operación.
- ❖ Desconexión de sistemas de seguridad a causa de frecuentes falsas alarmas.
- ❖ Confusión en la identificación y manejo de sustancias peligrosas.
- ❖ Falta de comunicación
- ❖ Incorrecta reparación o trabajo de mantenimiento.
- ❖ Realización de trabajos no autorizados (soldadura, entrada en espacios confinados)

Es importante destacar que los errores humanos están directamente relacionados con la falta de conocimiento de los operarios sobre los riesgos y su prevención, falta de capacitación para el trabajo a desempeñar o carga psíquica excesiva.

Es evidente que la seguridad en una instalación industrial debe comenzar en la fase de diseño, seleccionando los elementos adecuados para el proceso e instalarlos bajo normas y códigos vigentes con rigurosos controles de calidad. Sin embargo, las fallas como las citadas anteriormente son previsible, por ello es importante que todos los componentes de la instalación, como los elementos de seguridad, deban someterse regularmente a mantenimiento preventivo para garantizar su correcto funcionamiento (Gordillo, 2000). Por otra parte, los errores humanos deben ser especialmente analizados y controlados, ya que aunque el sistema cuente con los elementos en perfecto funcionamiento y bajo condiciones estandarizadas, si el personal operativo no cuenta con capacitación y el conocimiento debido sobre la importancia de la comunicación en las actividades de la planta, se pueden desencadenar lamentables consecuencias.

De lo anterior radica la importancia de desarrollar una estimación cuantitativa o cualitativa del nivel de riesgo potencial de una actividad, basado en una técnica de análisis de riesgo, involucrando a las personas, al medio ambiente e instalaciones, en términos de la magnitud del daño y la probabilidad de que se presente.

Es bien conocido, a nivel internacional, el desarrollado de diversas metodologías y modelos para la evaluación y estimación de riesgos, en especial en la industria química. Entre los elementos comúnmente usados son los siguientes (CENAPRED, 2001):

- A) La identificación del uso de sustancias y su vía de entrada (y la importancia de la búsqueda de un peligro o riesgos en un sistema equivalente)

- B) Entre los métodos *clásicos* de evaluación de consecuencias, puede encontrarse a los siguientes:
 - a) Métodos comparativos:
 - Listas de verificación de procesos / sistemas
 - Revisión / Auditoría de seguridad
 - Valor de riesgo relativo (por ejemplo, los índices Mond y Dow)
 - Análisis preliminar de peligros
 - b) Métodos fundamentales:
 - Estudios de peligro y operabilidad
 - Análisis:
 - ¿Qué pasa si...? (What if...?)
 - Falla de modo y efecto
 - Falla de modo, efecto y condiciones críticas
 - Fallas orientado a metas
 - c) Métodos de diagramas lógicos:
 - Análisis:
 - Árbol de fallas
 - Árbol de eventos
 - Causa - Consecuencia
 - Confiabilidad humana

- C) En el control: la aplicación y reforzamiento de los estándares técnicos, operativos y legales.
 - a) Paquetes de información y descripción
 - b) Sistema de justificaciones descriptivas y analíticas

- D) En la mitigación: la planeación en el sitio de emergencia
 - a) Planeación de la atención de la emergencia
 - b) Información para aquellos que pueden ser afectados por los riesgos
 - c) Control sobre usos incompatibles de suelo
 - d) Control en sitio de las fuentes de riesgo

Los métodos que se emplean en la actualidad son herramientas valiosas para identificar, medir, comparar y controlar los riesgos existentes en una industria; de forma científica, técnica y práctica (Mantilla, 2006).

En la siguiente sección, se revisarán algunos de los métodos que se utilizan en el análisis de riesgos en las instalaciones industriales, en especial, las que involucran procesos químicos.

2.3.1 Listas de verificación (Check list)

Las listas de verificación, también conocidas como Check list, son herramientas comúnmente utilizadas en los procesos industriales para comprobar el cumplimiento de los estándares en la operación y seguridad establecidos, analizando los diferentes aspectos y detalles de una instalación para así detectar los riesgos más comunes en los mismos (Ortega, 2009).

Se emplean en las etapas de diseño, construcción, puesta en marcha y operación de un proyecto, y sirven como medio de comunicación, control y aprobación para así proseguir con las etapas del proceso.

El método se basa en la normatividad; si bien, pueden ser enriquecidas por personal con amplia experiencia en la industria que se desee evaluar, porque en muchas ocasiones, ellos cuentan con mayor información debido a su actuar cotidiano. Las listas de verificación son útiles, entre otras cosas, para recopilar la normatividad, estándares y códigos que deben cumplirse en una industria en un determinado tiempo y espacio (Stamatis, 2003).

2.3.2 Análisis preliminar de riesgos (PHA)

El Análisis preliminar de riesgos, o PHA por sus siglas en inglés (Preliminary Hazard Analysis), es una herramienta utilizada para identificar y clasificar los posibles escenarios de riesgos de un proceso. Se usa como precursor de un análisis más sofisticado de riesgo manejando la información que se obtiene de este análisis.

La aplicación de esta metodología, requiere de un grupo de expertos, que tengan un conocimiento amplio sobre el sistema a analizar. Para llevar a cabo este análisis, se sugiere la siguiente metodología: recaudar información sobre el sistema que se desea estudiar, identificar las áreas de mayor riesgo, determinar los posibles escenarios para que se presente un evento, diagnosticando así las causas; una vez teniendo un

panorama sobre las causas, se identifican las consecuencias y la fatalidad de cada escenario estudiado para después proponer alternativas que contribuyan a la reducción del riesgo (Castillo, 2013).

2.3.3 Análisis “¿Qué pasa si...? (“What if”)

Para la implementación de esta técnica, se requiere información específica del proceso a estudiar, analizando la información para generar las preguntas del tipo: ¿Qué pasa si...? (“What if?”), las cuales son adecuadas durante el tiempo de vida de la instalación, cuando es necesario hacer cambios en los procesos o al procedimiento de operación de los mismos. Este método de tipo cualitativo consiste en formular una serie de preguntas, desarrollar respuestas y evaluarlas, visualizando las posibles consecuencias de las prácticas estudiadas, con el objetivo de identificar los riesgos y consecuencias, así como encontrar formas factibles de minimizarlos (CENAPRED, 2001). La técnica requiere de documentación fiable y detallada, basada en la observación del proceso, equipos y procedimiento de operación de la planta, así como en la experiencia de los operarios, por eso es importante que el estudio lo realice un equipo de personas con experiencia sobre el proceso.

2.3.4 Método de modos de falla y efectos (FMEA)

El método de modos de falla y efectos, también conocido por sus siglas en inglés FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), es una herramienta de análisis para la identificación, evaluación y prevención de las posibles fallas y efectos que pueden presentarse en un proceso (Gordillo, 2000). Es útil en la identificación de las causas que provocarían el mal funcionamiento en los equipos, procesos y/o operatividad de la industria, y en las cuales se aplican acciones de tipo preventivo y correctivo.

Esta técnica proporciona información sobre un escenario específico y sobre las consecuencias posibles de un accidente, pero presenta el inconveniente de no permitir la identificación plena de todos los riesgos y las combinaciones de fallas de equipos que conducen a eventos no deseados.

2.3.5 Método de árbol de fallas

Es un método deductivo de análisis de riesgo que parte de la selección de un accidente o evento que se pretende evitar. Se puede tratar de fallas en los equipos o procedimientos que pueden provocar un accidente de gran magnitud como una

explosión, fuga o derrame de algún material peligroso, o por el contrario, un suceso de menor importancia como la falla en un sistema de cierre (INSHT, 2013). La detección de las fallas se lleva a cabo en dos etapas: primero se reúne la información necesaria acerca de las causas y las consecuencias de las fallas en las secciones del sistema, después esta información se almacena y se utiliza en la segunda etapa, la construcción del árbol de fallas, donde es más fácil identificar los errores en los componentes del sistema que causan los eventos no deseados (Hurdle, 2009).

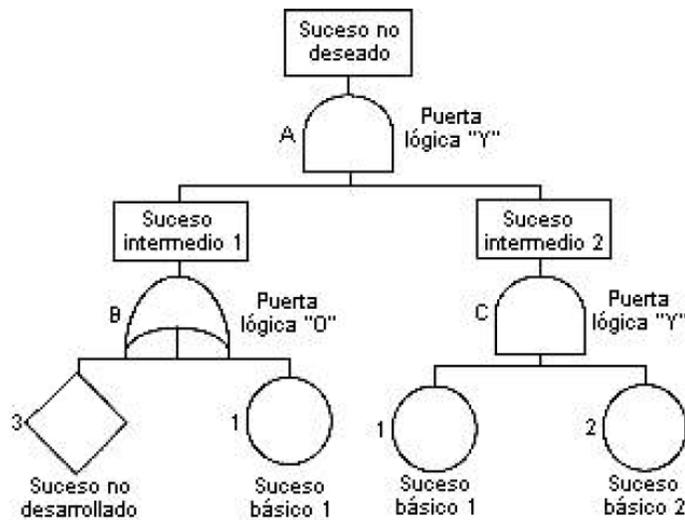


Figura 2.1. Representación del árbol de fallas (INSHT, 2013).

El objetivo de construir un árbol de fallas (Figura 2.1) consiste en identificar el origen de dichos eventos, desarrollando un modelo sistemático y lógico donde se representan, por medio de símbolos, las combinaciones de las situaciones que pueden conducir a la producción del accidente o evento no deseado.

2.3.6 Método de riesgo y operatividad (HAZOP)

El estudio de riesgo y operatividad, HAZOP (Hazard and Operability), surgió con el objetivo de identificar los posibles riesgos en las instalaciones que utilizan materiales peligrosos, eliminando cualquier fuente que puede desencadenar accidentes graves, tales como las emisiones tóxicas, explosiones e incendios.

Debido a que entre el 50 y 90% de los riesgos operacionales se atribuyen a errores humanos, la evolución de la metodología HAZOP se ha enfocado además en la interacción del ser humano con los procesos para prevenir accidentes implementando

mejoras en los métodos de operación, capacitación y la forma de organización en la industria (Dunjóá, et al., 2009).

Al aplicar esta técnica es necesario realizar una descripción completa del proceso y estudiar cada parte del mismo de tal manera que se puedan identificar claramente las causas que originan las posibles desviaciones en él y las consecuencias que se presenten. Una vez analizado a detalle todo el proceso e identificado las situaciones no deseadas, se procede a implementar acciones encaminadas a mejorarlas.

2.3.7 Índice Dow para fuego y explosiones

El índice de Dow fue creado por Dow Chemical para evaluar, objetivamente, la posibilidad real de un incendio o explosión en la industria química. El principal objetivo de esta herramienta es facilitar la selección del método adecuado de protección contra incendios, obteniendo además, información que permite cuantificar de manera anticipada, las pérdidas ocasionadas por incendios y explosiones haciendo un análisis detallado del proceso para identificar las causas que generaron dichos eventos y ponderando los riesgos potenciales para una valoración económica que determine el daño máximo probable a las instalaciones (Gupta, 1997).

Este índice es un número que se obtiene en base a diferentes factores, que indica el manejo de fuego y/o explosión de una unidad específica del sistema. Los factores que se analizan para llevar a cabo el cálculo pertinente, son los siguientes (Etowa, et al., 2002):

- Factor del material
- Riesgos generales de proceso.
- Riesgos especiales del proceso.
- Riesgos unitarios de proceso.

Este sistema separa cada proceso industrial en sectores específicos identificando materiales, actividades y propiedades termodinámicas relevantes, requiriendo un diseño preciso de la unidad industrial analizada, diagramas de flujo, información económica de costos y beneficios, y formatos sistematizados de reporte, entre otros elementos.

El éxito de esta técnica radica en la habilidad para analizar a profundidad cada etapa del proceso, identificando los datos más relevantes para la posterior evaluación, asignando las bonificaciones y penalizaciones pertinentes a cada factor relevante de las unidades en la planta.

2.3.8 Índice de Mond para explosión, incendio y toxicidad

Este procedimiento de análisis de riesgo fue desarrollado por la Imperial Chemical Industries (ICI) basándose en el método Dow, tratado anteriormente, representa un índice más completo que involucra un mayor número de parámetros de riesgos y bonificaciones para el cálculo de la peligrosidad de los productos utilizados en el proceso a estudiar, tomando en cuenta antecedentes de operación en instalaciones con características semejantes (Rubio, 2004).

Al igual que los métodos analizados anteriormente, se basa en un estudio detallado fijando especial atención en las propiedades fisicoquímicas de las sustancias, el volumen utilizado, en el proceso y en la operación del mismo.

Este método tiene como objetivo determinar los siguientes factores para llevar a cabo la evaluación del riesgo (Lees, 2005):

- Factor del material.
- Riesgos especiales de la sustancia.
- Riesgo general del proceso.
- Riesgo especial del proceso.
- Riesgo de inventario..
- Riesgos por tipo de construcción y disposición de los equipos e instalaciones.
- Riesgo de toxicidad.

2.3.9 Árbol de sucesos

El árbol de sucesos es una técnica de análisis de riesgos semi-cuantitativo, la cual describe el desarrollo de un suceso iniciador que se desencadena en el tiempo por factores condicionantes que son responsables de la evolución del mismo, obteniendo como resultado las secuencias accidentales que conllevan a distintos eventos (PCE, 2013).

Este modelo permite calcular la frecuencia de dichos eventos, partiendo de la frecuencia del suceso iniciador y utilizando probabilidades para los factores condicionantes. Es importante mencionar que los valores de frecuencias y probabilidades son obtenidas de fuentes bibliográficas por lo que esta técnica está sujeta a incertidumbre, ya que estos valores son obtenidos bajo estudios realizados en plantas y procesos cuyas condiciones pueden ser similares a las que se estudian (PCE, 2013).

3 SIMULACIÓN DE RADIOS DE AFECTACIÓN

En los procesos industriales, o en cualquier actividad en la cual se involucren sustancias químicas, es de vital importancia un estudio de riesgo y prevención, en el cual se consideran principalmente, la seguridad del personal y las pérdidas económicas que pueden ocasionarse cuando las condiciones del proceso están fuera de control, sin dejar de lado las áreas geográficas que pueden ser potencialmente afectadas por la liberación no controlada de una sustancia peligrosa que puede causar graves consecuencias a la salud o muerte de seres humanos. Atendiendo a las características de las sustancias presentes, las áreas pueden ser afectadas por (CENAPRED, 2001):

- La liberación de sustancias tóxicas al aire,
- Ondas de calor producidas por un incendio,
- Una explosión de materiales inflamables, o
- Por ondas de sobrepresión ocasionadas por una explosión.

Para la simulación de los radios de afectación, es decir, las áreas vulnerables, se toman en cuenta diversos factores, entre los cuales están los siguientes:

- La cantidad de material liberado,
- La velocidad a la cual se libera,
- Las condiciones existentes para la dispersión,
- La concentración de la sustancia,
- Las características toxicológicas de la sustancia
- La topografía y características físicas del sitio en el que ocurre la liberación,
- La estabilidad atmosférica en el momento del accidente, entre otros factores.

El procedimiento de análisis de riesgo cuantitativo facilita la simulación matemática de fugas, derrames, dispersiones, igniciones, incendios y explosiones, además de la estimación de riesgos ambientales y pérdidas por paros en la producción, así como los costos de reparación de daños. Dichos eventos pueden calcularse de forma aproximada a partir de referencias bibliográficas y registros elaborados por la empresa.

En la actualidad, hay una gran variedad de programas para simular en computadora los efectos causados por eventos riesgosos, determinando la forma de las zonas vulnerables, siendo necesario contar con una serie de datos que hagan posible un cálculo más preciso.

Resulta de gran utilidad la elaboración de un inventario que cuente con los objetos más relevantes, como son: las empresas que laboran en el área a estudiar así como los materiales peligrosos (indicando las cantidades utilizadas), el registro del transporte de sustancias químicas que transitan por el área, el reporte de accidentes de la zona, el número de habitantes, etc. (Zagal, 1996).

Una vez que se cuenta con el inventario, es necesario corroborar la información con la que se cuenta, realizando recorridos en la zona a estudiar, verificando visualmente la topografía, ubicación y población presente.

Cuando se cuenta con la información necesaria para hacer el cálculo, se puede recurrir a un programa para simular los radios de afectación. Actualmente se tienen diferentes programas de simulación, algunos se pueden encontrar al alcance del público en general, otros requieren de una licencia para su funcionamiento (ver tabla 3.1).

Tabla 3.1. Programas computacionales comúnmente utilizados para el análisis de consecuencias.

Programa	Descripción	Origen
EFFECTS	Paquete de evaluación de las consecuencias derivadas de un escape de fluido (flujo, evaporación, dispersión, explosión e incendio)	The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (TNO)
HEGADAS	Cálculo de dispersión atmosférica de escapes de gases pesados.	SHELL
FRED	Paquete de evaluación de las consecuencias derivadas de un escape de fluido (flujo, evaporación, dispersión, explosión e incendio)	SHELL
ALOHA	Paquete de evaluación de las consecuencias derivadas de un escape de fluido (flujo, evaporación, dispersión, explosión e incendio)	EPA (Environmental Protection Agency)
CANARY	Paquete de evaluación de las consecuencias derivadas de un escape de fluido (flujo, evaporación, dispersión, explosión e incendio)	QUEST CONSULTANTS INC.
SCRI-FUEGO	Modelo de simulación para análisis de consecuencias por fuego y explosión	Dinámica Heurística S.A.
SCRI-MODELOS	Modelo de simulación para emisiones de contaminantes, fugas y derrames de productos tóxicos y/o inflamables y daños por nubes explosivas	Dinámica Heurística S.A.

Fuente: (Saá, 2009).

Entre los programas más utilizados en la industria, se encuentra el SCRI (Simulación de Contaminación y Riesgos en la Industria) en sus versiones SCRI- MODELOS y SCRI-FUEGO.

El SCRI- MODELOS es un conjunto de herramientas para simular en computadora emisiones de contaminantes, fugas y derrames de productos tóxicos y/o inflamables y daños por nubes explosivas, para estimar escenarios de afectación por emisiones continuas o instantáneas (CENAPRED, 2006).

Este programa está integrado con diferentes modelos, de tal manera que sea posible simular diferentes escenarios (CENAPRED, 2006):

- Modelo de dispersión de una emisión puntual continua de gas.
- Modelo de dispersión de un gas o vapor proveniente de una fuga o derrame de un líquido que se evapora.
- Modelo de dispersión de un gas liberado en forma masiva e instantánea.
- Modelo de evaluación de daños provocados por nubes explosivas.

Los tres modelos de dispersión son del tipo Gaussiano y permiten obtener estimaciones de concentraciones en el aire, considerando condiciones particulares de emisión y estabilidad atmosférica. El modelo para daños por explosiones estima un equivalente en masa de TNT (Trinitrotolueno) de la sustancia considerada y simula la generación de ondas expansivas debidas a la explosión de una nube formada con la sustancia en cuestión.

Por otro lado, el SCRI-FUEGO es un programa que cuenta con modelos para analizar las consecuencias de los siguientes eventos de fuego y/o explosión (Dinámica Heurística, 2007):

- Modelo de fuego por llamarada (“Flash Fire”) de:
 - Emisiones por evaporación de un derrame
 - Emisiones de chorro horizontal
 - Emisiones de chorro vertical
 - Emisiones instantáneas o de corta duración
- Modelo de radiación térmica por bola de fuego por explosión de vapor en expansión de líquido en ebullición (“BLEVE”).
- Modelo de radiación térmica por fuego en derrames (“Pool Fire”)
- Modelo de radiación térmica por chorro de fuego (“Jet Fire”)
- Modelo de equivalencia de TNT para simular:
 - Cálculos de sobrepresión de explosivos verdaderos (TNT, pólvora, nitrato de amonio, etc.)

- Cálculos de sobrepresión de explosiones de nubes de vapor (Butano, gas LP, gas natural, hidracina, etc.)

El modelo de fuego en llamarada utiliza el modelo SLAB para dispersión de nubes densas del Lawrence Livermore National Laboratory de EUA.

Los paquetes para estimar en computadora los radios de afectación que se pueden presentarse en una industria debido a un accidente con sustancias peligrosas, son capaces de simular diferentes escenarios, pero para esto es importante tener conocimiento de los escenarios que pueden presentarse por almacenamiento de las mismas, para saber qué información requiere proporcionar el simulador para realizar el cálculo, así como saber interpretar los resultados que éste genere.

3.1 Escenarios para fuga y derrames

Uno de los problemas más importantes en las actividades relacionadas con sustancias químicas, se refiere a incendio, explosión y fuga tóxica de las mismas, constituyendo uno de los accidentes más frecuentes que tienen su origen en la fuga y derrame de una sustancia peligrosa y que suelen generar daños graves tanto a las personas expuestas como a los equipos de proceso, interrumpiendo así el proceso productivo y traduciéndose en pérdidas tanto humanas como económicas.

Dependiendo de las características y estado del fluido en cuestión, las fugas y derrames pueden presentarse en diferentes escenarios y provocar así mismo, diferentes escenarios catastróficos.

Si la fuga ocurre en fase gaseosa, se dispersa directamente en la atmósfera y si es en fase líquida y no es posible un adecuado control en un lugar seguro, podrá contaminar a través de la red general de desagües al suelo y cauces fluviales, además de vaporizarse y dispersarse en el aire.

Los diferentes escenarios de emisión al ambiente definen el estado físico de la sustancia química al dejar el contenedor y la forma en que ésta entra a la atmósfera para formar una nube de vapor. Considerando las propiedades químicas y las condiciones de almacenamiento previos a la emisión, las sustancias pueden ser descargadas de un recipiente o contenedor como un líquido, un vapor o ambos. Los líquidos emitidos pueden formar una nube de vapor por volatilización. Un líquido puede ser volatilizado completamente o parcialmente al ser emitido, formando una nube de vapor o una mezcla de vapor y gotitas. A su vez, los vapores pueden condensarse total o parcialmente para formar gotas de líquido al ser emitidos. El vapor condensado,

puede caer al piso para formar un charco que posteriormente, se volatiliza a la atmósfera (INSHT, 2007).

El conocer qué tipo de fenómeno puede presentarse, permite la estimación de las tasas de emisión y seleccionar entre las diferentes técnicas de modelación. La selección del modelo de emisión depende del tipo de escenario en el que sucede la liberación, del material liberado y de sus propiedades (Méndez, 2013).

3.1.1 Emisión de gas en dos fases

Una emisión de un gas en dos fases, es una descarga de un gas, que parcialmente se condensa para formar dos fases (gas y líquido). El material puede estar almacenado ya sea como un gas comprimido o como un gas licuado; sin embargo, una emisión de un gas en dos fases de un almacenamiento de un gas licuado debe venir del espacio de vapor del contenedor. Esta emisión ocurre debido al enfriamiento del gas al expandirse, porque la presión cae con la descarga del material. Como resultado se tiene una expansión adiabática, que subenfía algo o todo el material, lo que ocasiona la formación de una fase líquida inmediatamente después de la descarga (Dinámica Heurística, 2012).

La figura 3.1 ilustra la clase de emisión de un gas en dos fases. El líquido puede gotear de la emisión de vapor/líquido y formar un charco que se evaporará. El líquido condensado puede formar un "aerosol" o neblina finamente dispersa, que es transportada viento abajo dentro de la nube de vapor, y que finalmente se vaporiza. La formación de un charco, aerosol o combinación de las dos, depende de las características del material y de la descarga.

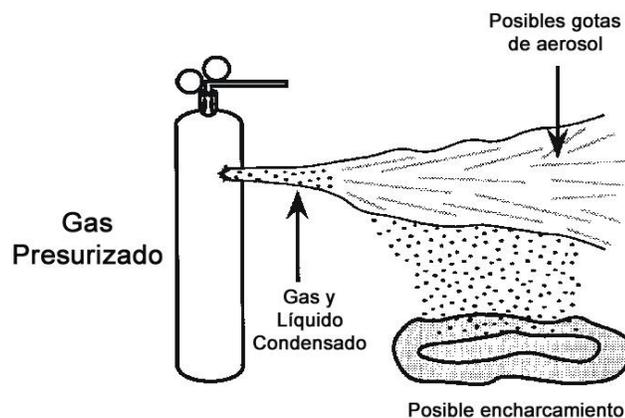


Figura 3.1. Emisión de gas en dos fases (Dinámica Heurística, 2013).

3.1.2 Emisión de líquido presurizado en dos fases

Una emisión de un líquido en dos fases, es una descarga de un líquido que se vaporiza parcialmente para formar dos fases (gas y líquido). Una emisión en dos fases de un líquido presurizado es una descarga de un material en fase líquida, que es un gas en condiciones ambientales. El material se mantiene en la fase líquida mediante presión en el recipiente. Después de la descarga, la presión del líquido cae inmediatamente a la presión ambiental, resultando en la repentina vaporización de algo o todo el líquido. Este fenómeno es denominado un borbollón o conversión adiabática. La fracción de conversión, define la fracción del líquido que se convierte a vapor y la cantidad de conversión, depende tanto de la temperatura de almacenamiento, como de las propiedades fisicoquímicas del material (la temperatura de ebullición normal y el valor de vaporización) (Dinámica Heurística , 2012).

En la figura 3.2 se muestra una emisión de un líquido en dos fases en condiciones donde ocurre la formación de líquido y vapor. Como en el caso con emisiones de gas en dos fases, la porción del líquido puede formar un aerosol, cuya tendencia de formación es mayor cuando el material es almacenado bajo presión que cuando el material es refrigerado, puesto que la energía de la descarga tiende a ser relativamente alta para emisiones presurizadas.

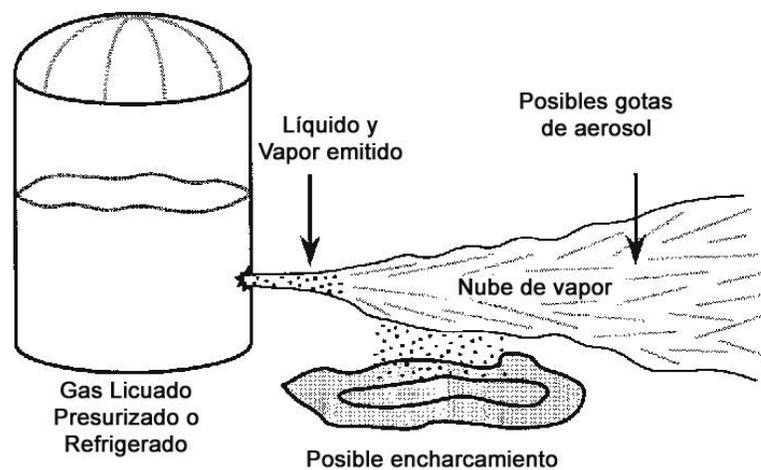


Figura 3.2. Emisión de líquido en dos fases (Dinámica Heurística, 2013).

3.1.3 Emisión de líquido refrigerado en dos fases

En este tipo de emisión, el material almacenado se mantiene en fase líquida por refrigeración, pero existe como vapor a temperatura ambiente. En el contenedor, líquido está a una temperatura por debajo de su punto de ebullición, es decir, es

almacenado como líquido subenfriado. Si ocurre la conversión a vapor, ésta es generalmente moderada, dado que la temperatura de la descarga está normalmente justo arriba del punto de ebullición. Por eso la fracción convertida a vapor en una emisión de un líquido refrigerado en dos fases, es generalmente mucho menor que el de una emisión de un líquido presurizado en dos fases (Dinámica Heurística , 2012).

Respecto a la determinación del cálculo de los datos de entrada al modelo, la distinción principal entre una emisión de un líquido refrigerado en dos fases y de un líquido presurizado en dos fases involucra el cálculo de la tasa de emisión, que se basa en la diferencia entre la presión del contenedor y la presión ambiental. Puesto que los líquidos refrigerados se almacenan a la presión ambiental, la presión del contenedor se determina por la masa del líquido arriba de la localización de descarga (la altura del nivel del líquido). Esta fuerza es típicamente mucho menor, que para el caso presurizado y por eso generalmente resulta en una tasa de emisión menor.

El material emitido de una descarga en dos fases de un líquido refrigerado puede formar un aerosol y/o un charco de líquido. Si se forma el charco, éste se volatilizará al absorber calor de los alrededores y de la superficie del derrame. En la medida de que el charco se evapora, se enfría y la tasa de evaporación disminuye. La tendencia de formación de aerosol de un líquido refrigerado es mínima dado que la energía de la descarga es típicamente baja (Méndez, 2013).

3.1.4 Emisión de gas en una fase

La emisión de gas en una fase, es una descarga de un material que es gas en condiciones ambientales y permanece como gas durante la descarga (no se desarrolla la fase líquida). El material puede estar almacenado como gas comprimido o gas licuado. Una emisión de gas en una fase de un tanque de almacenamiento de gas licuado, debe venir del espacio de vapor dentro del contenedor (INSHT, 2007).

La figura 3.3 ilustra la emisión de un gas en una fase. Una emisión de gas no se condensará si su presión es demasiado baja como para resultar en un “subenfriamiento” del material durante la descarga (a una temperatura por debajo de su punto de ebullición) (Dinámica Heurística , 2012).

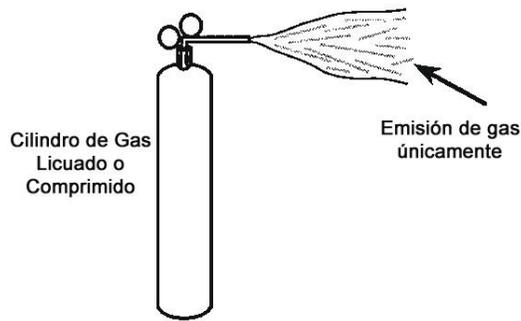


Figura 3.3. Emisión de gas en una fase (Dinámica Heurística, 2013).

3.1.5 Emisión de líquido de alta volatilidad en una fase

Una emisión de una fase de un líquido de alta volatilidad, es una descarga de un material que, aunque es gas a temperatura ambiente, es almacenado como líquido mediante refrigeración a una temperatura por debajo de su punto de ebullición. La emisión, es una descarga de una fase, si su temperatura de emisión está en o debajo del punto de ebullición normal del material, tal que no hay una conversión a dos fases.

El líquido emitido formará un charco, como se muestra en la figura 3.4, que se volatilizará al absorber calor de su entorno y de la superficie del derrame. La temperatura del charco se reducirá al evaporarse el material. Al calcular la tasa de emisión atmosférica, se asume que ocurre una volatilización inmediata del material (para efectos de cálculo de los datos de entrada al modelo) (Dinámica Heurística , 2012).

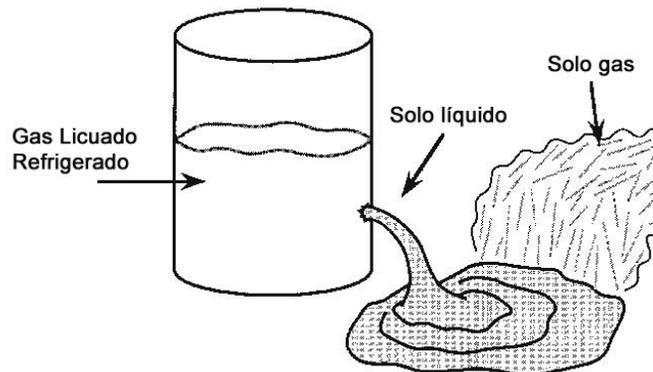


Figura 3.4. Emisión en una fase de líquido de alta volatilidad (Dinámica Heurística, 2013).

La tasa de emisión atmosférica sólo depende de la evaporación. Para determinarla se requiere conocer el área del charco, la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la volatilidad (presión de vapor) del líquido derramado.

3.1.6 Emisión de líquido de baja volatilidad en una fase

La emisión de un líquido de baja volatilidad en una fase es una descarga de un material que es líquido en condiciones ambientales. No se requiere ni presurización ni refrigeración, para mantener el material en estado líquido.

Un líquido de baja volatilidad formará un charco del líquido en la descarga (ver figura 3.5). La tasa de emisión de la masa del contenedor al charco, dependerá del tamaño de la descarga y de la altura del líquido arriba del agujero del recipiente. Para determinar la tasa de emisión atmosférica (la tasa de formación de la nube de vapor) de un líquido de baja volatilidad, se debe comparar la tasa de salida del líquido del recipiente con la tasa de emisión atmosférica (volatilización) para establecer la condición limitante (Méndez, 2013).

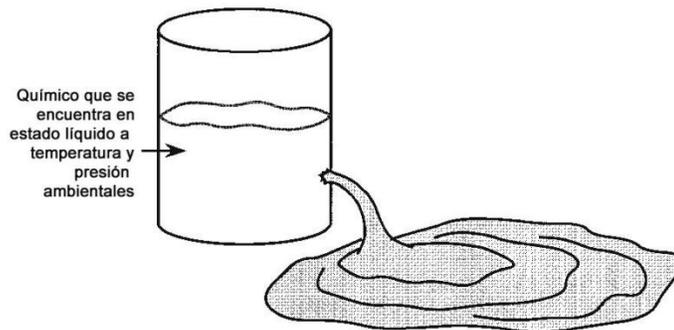


Figura 3.5. Emisión en una fase líquida de baja volatilidad (Dinámica Heurística, 2013).

3.1.7 Emisión múltiple

Un escenario de emisión dado, puede simultáneamente o secuencialmente producir una emisión que se ajusta a más de una de las clases de emisión descritas en las secciones anteriores. Para ilustrar como se pueden desarrollar múltiples clases de emisión, se da el siguiente escenario de ejemplo.

Un compuesto peligroso que es un vapor denso en condiciones ambientales, se almacena como un líquido bajo presión. Se daña una tubería de la parte inferior del

tanque y el líquido presurizado fluye a través de la tubería rota. La presión del líquido cae, al fluir a través de la tubería, resultando en evaporación de una parte del líquido dentro de la tubería (conversión adiabática) antes de que alcance el punto de ser emitido a la atmósfera. Una vez que todo el líquido sale a la atmósfera, el vapor comprimido restante es emitido a través de la abertura (Dinámica Heurística , 2012).

Este tipo de escenario de emisión, inicialmente resulta en una emisión de dos fases de líquido presurizado (ver figura 3.6). La fracción del líquido puede formar un aerosol, un charco de líquido de corta duración o una combinación de ambos. Si se asume que toda la fracción del líquido forma un aerosol, las tasas de emisión atmosférica (tasa de formación de la nube) se asume que es igual a la tasa de emisión de la masa de ambos, tanto de la fase líquida como de la fase gaseosa. Si toda la fracción del líquido se asume que forma un charco, la tasa de emisión atmosférica, sería la combinación de la tasa de emisión de vapor y la tasa a la cual se evapora el líquido en el charco. Si se asume una formación parcial de aerosol, se debe utilizar una combinación de los dos cálculos.

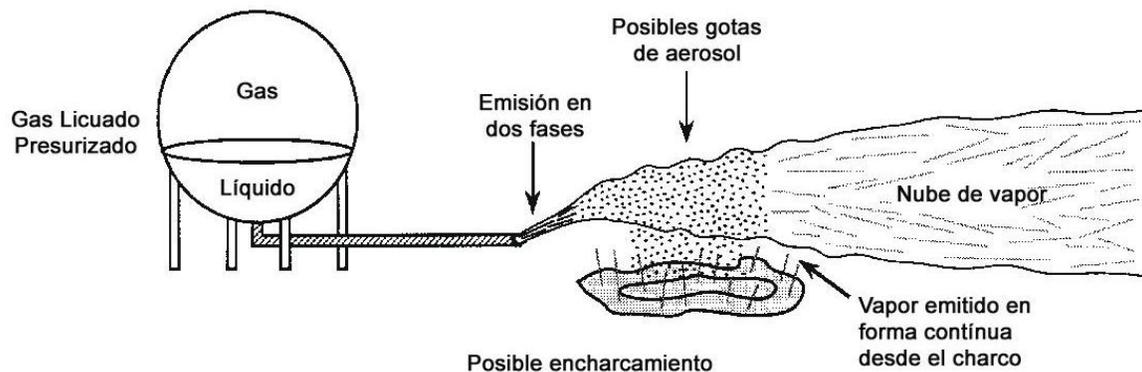


Figura 3.6. Ejemplo de escenario múltiple de emisión (Dinámica Heurística, 2013).

Es importante señalar que, para propósitos de estudios de modelación, la tasa de formación de la nube de vapor de la emisión de dos fases del líquido presurizado se asume que es igual a la suma de las tasas de emisión del vapor y líquido del depósito. La base de esta suposición es que cualquier charco que se forma, se evaporará muy rápidamente y la suposición de una vaporización inmediata resulta en la máxima tasa de generación de vapor (INSHT, 2007).

Una segunda clase distinta de emisión, resulta cuando todo el líquido es descargado del recipiente. El vapor comprimido restante será expulsado del tanque, como una emisión de gas en una o dos fases. La clase de emisión específica del gas y su tasa

de emisión se determinan por la presión del gas dentro del tanque. En las condiciones dadas, la presión del tanque irá disminuyendo al ser expulsado el gas. Sin embargo, para propósitos de este estudio, la presión inicial se utiliza para calcular la máxima tasa de emisión, la cual se asume que es constante por la duración de la descarga. Una tasa máxima de emisión tiende a producir resultados más conservadores en la modelación (Dinámica Heurística , 2012).

Un análisis de modelación de escenarios de un gas denso, involucrando múltiples clases de emisión, puede requerir combinar los resultados de múltiples corridas del modelo. Donde ocurren simultáneamente, múltiples tasas de generación de la nube de vapor, estas pueden ser agregadas para determinar la entrada de datos al modelo. Clases de emisión secuenciales o en traslape, puede ser necesarios considerarlos individualmente y en combinación, para determinar el enfoque más razonable para interpretar los resultados.

La tabla 3.2 muestra las posibles clases de emisión que pueden resultar de configuraciones de almacenamiento comunes, resume los criterios para determinar la clase de emisión inicial, y lista las clases potenciales de emisión subsecuentes, que se podrían desarrollar para cada situación de almacenamiento.

Tabla 3.2. Clases de emisión posibles como resultado de condiciones típicas de almacenamiento.

Condición de Almacenamiento	Clase de emisión inicial	Consideraciones de clase de emisión
Gas licuado (presurizado)	Líquido presurizado en dos fases (orificio abajo del nivel del líquido)	La emisión de la fase líquida puede formar gotas de aerosol y/o derrame líquido, que vaporiza muy rápidamente. Resulta en emisión de vapor después que el nivel del líquido está abajo del agujero o que se derrama todo el líquido. La emisión de vapor posterior puede ser de dos fases, una fase, flujo crítico o no crítico dependiendo de la presión de la emisión.
Gas licuado (presurizado)	Gas en una o dos fases (orificio arriba del nivel del líquido)	La emisión es de dos fases si hay condensación, ya sea con flujo crítico o no. Las clases de emisión siguientes pueden pasar de dos fases a una fase o de flujo crítico a no crítico si la presión disminuye con el tiempo. Sin embargo al estar el líquido en el depósito, la presión será relativamente constante a menos que un enfriamiento sustancial del líquido resulte de la vaporización en el recipiente.
Gas licuado (refrigerado)	Una sola fase, alta volatilidad	El líquido permanece en una sola fase, si la temperatura de emisión está debajo de la

		temperatura de ebullición. Se formará un derrame de corta duración que se evapora al absorber el calor del suelo. Después de que el nivel del líquido está debajo del orificio, se emitirá vapor. La presión de la emisión de vapor dependerá en la temperatura del líquido, pero normalmente estará debajo de la presión de condensación y de flujo crítico.
Gas licuado (refrigerado)	Líquido en dos fases (Agujero abajo del nivel del líquido)	Una emisión de dos fases ocurrirá si la temperatura de emisión está arriba de la temperatura de ebullición. La emisión normalmente es un chorro moderado puesto que la temperatura de emisión está normalmente cerca de la temperatura de ebullición. Posibles clases de emisión subsecuentes serán similares a emisión de un líquido en dos fases de un recipiente presurizado.
Gas licuado (refrigerado)	Gas en una fase (agujero arriba del nivel del líquido)	Dado que la condición de almacenamiento indica que el material está enfriado debajo de su punto de ebullición, la presión de vapor del líquido será menor de una atmósfera. Así, el vapor será emitido lentamente como un gas en una sola fase (en la medida en que el líquido permanezca enfriado). La presión probablemente estará abajo del mínimo requerido para condensación o flujo crítico. No se desarrollan clases subsecuentes de emisión.
Gas comprimido	Gas en una o dos fases	Si hay condensación dependerá de las propiedades del material y la presión del contenedor. El flujo puede ser crítico o no. Las clases de emisión subsecuentes son las mismas que por emisión de un gas de una o dos fases de un gas licuado presurizado. Puesto que no hay líquido en el contenedor, la presión disminuirá continuamente durante la emisión.
Líquido (material líquido a temperatura ambiente)	Líquido en una fase con baja volatilidad.	El líquido emitido formará un derrame que se volatiliza en base a la presión de vapor del material. Una emisión menor de vapor del depósito ocurrirá después de que se vacíe el líquido.

Fuente: (Dinámica Heurística , 2012).

3.2 Escenarios para explosión e incendio

La liberación de sustancias inflamables, gases o líquidos, pueden generar atmósferas peligrosas capaces de incendiarse o hacer explosión al encontrar cualquier punto de ignición en el entorno. Como resultado de un evento con materiales peligrosos, se pueden tener los siguientes escenarios:

- Explosión de nube de vapor no confinada
- Explosión por expansión de líquido en ebullición
- Explosión
- Explosión confinada
- Bola de fuego (Fireball)
- Charca de fuego (Poolfire)
- Fuego tipo chorro (Jet Fire)
- Fuego instantáneo (Flash Fire)

3.2.1 Explosión de nube de vapor no confinada

Las explosiones de nubes de vapor no confinadas, (traducción de la expresión en inglés Unconfined Vapour Cloud Explosion UVCE), se generan por la liberación de una cantidad determinada de vapor o líquido inflamable a partir del cual se formará el vapor, desarrollándose una nube que puede (Casal, et al., 1999):

- Dispersarse en el aire antes de que se produzca la ignición, sin causar daños;
- Prender inmediatamente e iniciar así un incendio de charco (por lo general, en este caso no habrá explosión y los daños ocasionados serán menores);
- Dispersarse en un área extensa y producirse la ignición al cabo de un cierto tiempo, de manera que se formará una gran llamarada;
- A partir de la llamarada, genera una onda de sobrepresión, debido a que el frente de la llama se acelera.

Son consideradas uno de los peligros con más impacto dentro de la industria química, a pesar de que los escapes tóxicos pueden producir más víctimas, es más probable que ocurra una explosión, cuya ignición puede producirse en un punto alejado de la fuente de origen de la liberación de la sustancia inflamable, afectando así grandes zonas (Casal, et al., 1999).

Las consecuencias debidas a este tipo de explosión pueden estimarse considerando: el periodo de la fuente (tiempo), cantidad de sustancia y tasa de emisión, seguido de un análisis de dispersión (González, 2011).

El accidente de Flixborough (figura 3.7), Gran Bretaña (1974), es una de las catástrofes más populares causada por una nube de vapor no confinada de unas 30 toneladas de ciclohexano y que dio lugar a una explosión equivalente a unas 16 toneladas de trinitrotolueno (T.N.T.) (CENAPRED, 2007).



Figura 3.7. Accidente de Flixborough en 1974 (INERCO, 2013).

3.2.2 Explosión por expansión de líquido en ebullición (BLEVE)

La BLEVE (“Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion”), como se ilustra en la figura 3.8, es un tipo de explosión mecánica que resulta de la ruptura de un recipiente que en su interior contiene un líquido o gas licuado, a presión elevada (normalmente a su presión de vapor). De tal manera que cuando se produce la ruptura del recipiente, el líquido contenido entra en ebullición súbitamente puesto que la temperatura en el exterior es superior a la temperatura de ebullición de la sustancia. Debido al cambio repentino de fase, de líquido a vapor, se forma una nube de vapor o gas inflamable que genera la explosión del depósito (superándose la resistencia mecánica del mismo) y una onda de presión acompañada de proyectiles del propio contenedor que alcanzan distancias considerables (CENAPRED, 2007).



Figura 3.8. Explosión tipo BLEVE (INERCO, 2013).

3.2.3 Incendios de charco (poolfire)

El efecto resultante de una fuga o derrame de líquidos inflamables es la formación de un charco, cuya extensión está en función de la geometría y naturaleza del suelo. Cuando la temperatura del líquido derramado es superior a la temperatura de ignición de la sustancia, por evaporación se generan gases inflamables. Estos vapores emitidos se mezclan con aire, y habiendo un aporte de energía de activación necesaria puede producirse un incendio (figura 3.9). El incendio también puede tener lugar inicialmente en el propio contenedor o depósito, pero en muchas ocasiones se produce la rotura del equipo produciendo la formación del charco.

Los principales peligros de este tipo de incendio son: la radiación térmica generada y los efectos de los posibles gases tóxicos generados en la combustión.



Figura 3.9. Típico escenario de incendio de charco (INERCO, 2013).

3.2.4 Dardo de fuego (jet fire)

El dardo de fuego, también llamado jet fire, es un tipo de incendio que se puede definir como (DGPC, 2002): “La ignición de una fuga continua de gases o vapores inflamables contenido en tuberías o recipientes bajo presión”. La fuga se produce a través de un orificio de tamaño pequeño respecto al tamaño del contenedor, o por escape de una tubería, produciéndose una salida turbulenta del combustible provocada por las altas presiones bajo las cuales fue almacenada, dando como resultado una flama de forma alargada.

Una de las principales consecuencias de la generación de un dardo de fuego es la radiación térmica (figura 3.10), la cual depende de numerosos factores como: las propiedades del combustible fugado, características de la llama, procesos químicos implicados en la combustión, así como las características de la fuga y las condiciones ambientales presentes (González, 2011).



Figura 3.10. Escena de un dardo de fuego (Dinámica Heurística, 2013).

3.2.5 Bola de fuego (fireball)

Una bola de fuego (figura 3.11) es un escenario que se produce por el estallido súbito y total, por calentamiento externo, de un recipiente que contiene un gas inflamable licuado bajo presión. El calentamiento externo es generalmente producido por un incendio de charco o de dardo de fuego, cuando hay contacto directo de la llama con la superficie del recipiente provoca que el material de la pared del mismo pierda resistencia mecánica y no pueda resistir la presión interior, generándose así un estallido súbito (Saá, 2009).

El núcleo de la bola de fuego lo conforma prácticamente el combustible, mientras que la capa externa donde ocurre la ignición, está formada por una mezcla aire-combustible. El origen de dicha nube, por lo general es una explosión BLEVE (CENAPRED, 2007).



Figura 3.11. Bola de fuego de BLEVE (INERCO, 2013).

4 MODELOS MATEMÁTICOS PARA EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS

La evaluación de consecuencias implica un conjunto de modelos matemáticos que ayudan a predecir el área afectada por accidentes con materiales peligrosos. Dichos modelos tienen un alto nivel de complejidad y correlacionan distintos parámetros que deben ser obtenidos a nivel de campo, por lo que los resultados obtenidos estarán en función de la calidad de la información administrada. Además, es importante tener en cuenta que los modelos han sido desarrollados para diferentes escenarios, por lo tanto se debe considerar el tipo de sustancia y su emisión a la atmósfera, así como el evento que desencadenaría si se generan las condiciones necesarias. A continuación se describen algunos de los modelos más importantes para el análisis de consecuencias, los cuales son utilizados por los software SCRI-Modelos y fuego.

4.1 Modelos de dispersión SLAB

El modelo SLAB son una serie de ecuaciones que simulan la dispersión atmosférica de emisiones más densas que el aire. La dispersión atmosférica de la emisión de gas denso, se calcula al resolver las ecuaciones de conservación de masa, energía y momentum, las cuales se definen a continuación (Ermak, 1990).

Masa

$$\frac{d(\rho UBh)}{dx} = \rho_a(V_e h + W_e B) + \rho_s W_s B_s \quad (4.1)$$

Donde:

x: Distancia en la dirección del viento (m)

ρ : Densidad de la nube (kg/m^3)

B: Ancho medio de la nube (m)

U: Velocidad de la nube en dirección del viento (m/s)

ρ_s : Densidad de la fuente (kg/m^3)

W_s : Velocidad de la fuente (m/s)

B_s : Ancho de la fuente (m)

ρ_a : Densidad del aire (kg/m^3)

V_e : Velocidad de entrada horizontal perpendicular a la dirección del viento (m/s)

h: Altura de la nube (m)

W_e : Velocidad entrante en dirección vertical (m/s)

Energía

$$\frac{d(\rho UBh C_p T)}{dx} = \rho_a(V_e h + W_e B) C_{pa} T_a + \rho_s W_s B_s C_{ps} T_s + f_{pc} + f_t \quad (4.2)$$

Donde:

C_p : Calor específico de la nube (J/kg K)

T : Temperatura de la nube (K)

C_{pa} : Calor específico del aire (J/kg K)

T_a : Temperatura ambiental (K)

C_{ps} : Calor específico en la fuente (J/kg K)

T_s : Temperatura en la fuente (K)

f_{pc} : Energía de cambio de fase (J/m s)

f_t : Flujo de calor que atraviesa la superficie (J/m s)

Momentum en el eje X

$$\frac{d(\rho UBhU)}{dx} = -\frac{1}{2}g \frac{d[Bh^2(\rho - \rho_a)]}{dx} + \rho_a(V_e h + W_e B)U_a + f_u \quad (4.3)$$

Donde:

U_a : Velocidad del viento (m/s)

f_u : Fricción en la dirección del viento (kg/s²)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

Momentum en el eje Y

$$\frac{d(\rho UBhV_g)}{dx} = g(\rho - \rho_a)h^2 + f_{vg} \quad (4.4)$$

Donde:

V_g : Velocidad del flujo por gravedad en dirección horizontal (m/s)

f_{vg} : Fricción del viento transversal (kg/s²)

Momentum en el eje Z

$$\frac{d(\rho UBhW_e)}{dx} = -g(\rho - \rho_a)Bh + f_w \quad (4.5)$$

Donde:

f_w : Fricción vertical (kg/s²)

La figura 4.1 es un esquema de la dispersión de una nube de gas denso, la cual está distribuida en un plano con dimensiones x , y y z , con acotaciones de las variables involucradas en las ecuaciones descritas anteriormente.

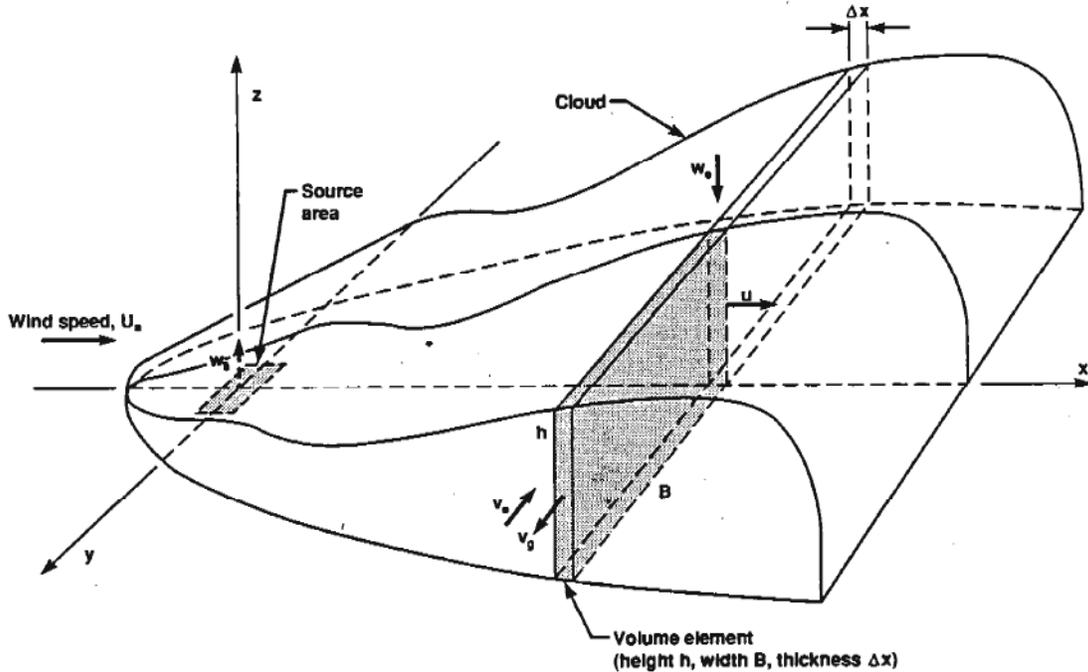


Figura 4.1. Esquema de dispersión de una nube de gas denso estudiada por el modelo SLAB (Ermak, 1990).

La distribución de la concentración volumétrica en las 3 direcciones (x, y, z) se expresa de la siguiente manera:

$$C(x, y, z) = 2Bh * C(x) * C_1(y, b, \beta) * C_2(z, Z_c, \sigma) \quad (4.6)$$

Donde:

$$C(x) = \frac{M_a m}{M_s + (M_a - M_s) m} \quad (4.7)$$

$$C_1(y, b, \beta) = \frac{1}{4b} \left[erf \left(\frac{y + b}{\sqrt{2}\beta} \right) - erf \left(\frac{y - b}{\sqrt{2}\beta} \right) \right] \quad (4.8)$$

$$B^2 = b^2 + 3\beta^2 \quad (4.9)$$

$$C_2(z, Z_c, \sigma) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{\sigma} \left[\exp\left(-\frac{(z - Z_c)^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + Z_c)^2}{2\sigma^2}\right) \right] \quad (4.10)$$

M_a : Masa molecular del aire (g/mol)

M_s : Masa molecular de la fuente (g/mol)

m : Fracción de masa (adimensional)

σ : Parámetro de dispersión (m)

B, b, h, β y Z_c : Parámetros de tamaño y forma de la nube (m)

x : Distancia en la dirección del viento (m)

y : Distancia horizontal perpendicular al viento (m)

z : Altura de la fuente (m)

4.2 Modelo de dispersión Gaussiano

El modelo de dispersión de la pluma Gaussiana predice las concentraciones de contaminantes medias y de estado estacionado relacionando parámetros como la velocidad del viento, altura efectiva y condiciones atmosféricas presentes. El modelo está basado en las siguientes suposiciones (Masters, et al., 2008):

- La tasa de emisiones de la fuente es constante.
- La velocidad del viento es constante en el tiempo y con la elevación.
- El contaminante es conservativo
- El terreno es relativamente llano, en campo abierto.

La ecuación modela escapes continuos de una fuente puntual y determina la concentración de la nube en un punto a nivel del suelo ($z=0$) con la ecuación 4.11 (Masters, et al., 2008):

$$C(x, y) = \frac{Q}{\pi U_H \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (4.11)$$

Donde

$C(x, y)$: Concentración a nivel del suelo del punto (x, y) , (kg/m^3)

x : Distancia en la dirección del viento (m)

Y : Distancia horizontal perpendicular a la dirección del viento (m)

Q : Tasa de emisión de contaminantes (kg/s)

H: Altura efectiva (m), ($H = h + \Delta h$, donde h: altura física, y Δh : elevación de la columna)

U_H : Velocidad media del viento en la altura efectiva de la chimenea (m/s)

σ_y : Coeficiente de dispersión horizontal (m)

σ_z : Coeficiente de dispersión vertical (m)

Los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z dependen de las clases de estabilidad atmosférica de Pasquill, mostradas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Categorías de estabilidad atmosférica.

Estabilidad	Categoría	Características
A, B	Inestable	Implica una mayor turbulencia y dispersión más rápida. La dispersión de contaminantes se produce por convección y mezcla forzada (las parcelas de aire se mueven libremente hacia arriba o hacia abajo). Es la situación típica de los días soleados, especialmente cuando la velocidad del viento y la humedad son bajas, y también cuando masas de aire caliente fluyen sobre superficies frías.
C	Neutral	El cambio de velocidad ambiental es aproximadamente igual al cambio de velocidad seca adiabática, la convección y la mezcla de las capas de aire se lleva a cabo sin forzar. Se relaciona con cielos nublados y velocidades del viento moderadamente fuertes.
D	Estable	Se presenta menor turbulencia y dispersión más lenta. El cambio de velocidad atmosférica es sub-adiabática (menor que la adiabática), la dispersión de los contaminantes se da por convección y mezcla forzada. Físicamente, este tipo de condiciones se da en días que tienen alturas de mezclado relativamente bajas, no hay fuentes de calor y la velocidad del viento es baja.
E,F	Muy estable	Se presenta una temperatura de inversión, es decir, la superficie de la tierra y la superficie próxima al aire se enfrían rápidamente y la temperatura aumenta con la altura. Es común que se presente por la noche con cielos bajos y claros (radiación inversa).

Fuente: (CENAPRED, 2001).

Las categorías de estabilidad atmosférica a su vez se relacionan directamente con la velocidad del viento, el nivel de insolación y nubosidad presente (tabla 4.2).

Tabla 4.2. Clasificaciones de estabilidad atmosférica.

Velocidad del viento (m/s)	Insolación diurna			Nubosidad nocturna	
	Fuerte	Moderada	Leve	Nublado ($\geq 4/8$)	Despejado ($\leq 3/8$)
< 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

Fuente: (Masters, et al., 2008).

4.3 Ecuaciones para fuego y explosiones

En este apartado se abordarán una serie de modelos matemáticos utilizados para el análisis de consecuencias por fuego y explosiones, tales como los escenarios de: BLEVE, bola de fuego, incendio de charco, dardo de fuego, llamarada y nubes explosivas. Las ecuaciones para determinar los efectos de eventos como BLEVE y bola de fuego, incendio de charco y dardo de fuego, fueron tomadas del manual Modelos de simulación para análisis de consecuencias por fuego y explosiones de Dinámica Heurística (2012).

4.3.1 BLEVE y Bola de Fuego

Una BLEVE ocurre cuando una gran masa de líquido presurizado es emitida repentinamente a la atmósfera. El líquido sobrecalentado puede evaporarse rápidamente incrementando su volumen más de 200 veces. Si el líquido emitido es inflamable, se puede formar una bola de fuego. A continuación se presentan algunas ecuaciones para el cálculo de parámetros como el diámetro (ecuación 4.12), duración (ecuaciones 4.13 y 4.14), altura (ecuación 4.15) y radiación emitida de una bola de fuego.

Diámetro máximo de una bola de fuego (m)

$$D_{m\acute{a}x} = 5.8 M^{\frac{1}{3}} \quad (4.12)$$

Duración de la bola de fuego (s)

$$t_{BLEVE} = 0.45 M^{\frac{1}{3}} \text{ para } M < 30000 \text{ kg} \quad (4.13)$$

$$t_{BLEVE} = 2.6M^{\frac{1}{6}} \text{ para } M > 30000 \text{ kg} \quad (4.14)$$

Donde:

M: Masa inicial del líquido inflamable (kg).

Altura al centro de la bola de fuego (m)

$$H_{BLEVE} = 0.75D_{m\acute{a}x} \quad (4.15)$$

Radiación

Para determinar el flujo radiante, la siguiente ecuación involucra parámetros como la masa de combustible, la duración y potencia térmica emisiva (ecuación 4.16).

$$E_r = \frac{2.2\tau_a R H_c M^{2/3}}{4 \pi X_c^2} \quad (4.16)$$

Donde:

E_r : Flujo radiante recibido por el receptor (W/m^2)

τ_a : Transmisividad atmosférica (adimensional)

R: Fracción radiante del calor de combustión (adimensional)

H_c : Calor neto de combustión por unidad de masa (J/kg)

M: Masa inicial de combustible en la bola de fuego (kg)

X_c : Distancia del centro de la bola de fuego al receptor (m)

Transmisividad atmosférica

La transmisividad atmosférica es un parámetro que relaciona aspectos del medio ambiente como lo es la humedad relativa. La radiación térmica al ser emitida, se absorbe y dispersa en la atmósfera causando que la radiación recibida por el receptor sea menor y está dada por la ecuación 4.17.

$$\tau_a = 2.02(P_w X_s)^{-0.09} \quad (4.17)$$

Donde:

P_w : Presión parcial del agua (N/m^2). Se determina con la ecuación 4.18.

X_s : Distancia de la superficie de la flama al receptor (m)

La expresión de la presión parcial del agua está en función de la humedad relativa y temperatura del aire, y se calcula con la siguiente expresión:

$$P_w = 1013.25RH e^{(14.4114 - \frac{5328}{T_a})} \quad (4.18)$$

Donde:

RH: Humedad relativa (%)

T_a : Temperatura ambiente (K)

4.3.2 Incendio de charco (Pool Fire)

El principal efecto de este tipo de incendio es la radiación térmica de la flama. Los efectos térmicos dependen de diversos factores como el tipo de combustible, la geometría del derrame, la duración del fuego, la localización del receptor, entre otros. Existen modelos matemáticos que permiten determinar la cantidad de radiación térmica hacia el receptor, así como parámetros que describen las dimensiones de un incendio de charco.

Tasa de combustión

La tasa a la que el nivel del líquido combustible disminuye (para derrames con diámetros mayores a 1 m) se calcula con la ecuación 4.19.

$$y_{m\acute{a}x} = 1.27 \times 10^{-6} \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*} \quad (4.19)$$

Donde:

$y_{m\acute{a}x}$: Tasa de decremento en el nivel vertical del líquido (m/s)

ΔH_c : Calor neto de combustión (kJ/kg)

ΔH^* : Calor de vaporización en el punto de ebullición (kJ/kg)

Para calcular el calor de vaporización en el punto de ebullición (ecuación 4.20) involucra el calor de vaporización del líquido y el calentamiento del líquido de la temperatura ambiente hasta la temperatura de ebullición del mismo.

$$\Delta H^* = \Delta H_v + \int_{T_a}^{T_b} C_p dT \quad (4.20)$$

Donde:

ΔH_v : Calor de vaporización del líquido a la temperatura ambiente (kJ/Kg)

C_p : Capacidad calorífica del líquido (kJ/kg-K)

T_b : Temperatura de ebullición del líquido combustible (K)

T_a : Temperatura ambiental (K)

Tasa de combustión

La tasa de combustión de masa del derrame se puede estimar con la ecuación 4.21.

$$m_B = 1 \times 10^{-3} \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*} \quad (4.21)$$

Donde:

m_B : Tasa de combustión de masa (kg/m²s)

Altura de la flama

La expresión para calcular la altura de la flama (ecuación 4.22) incluye el término del diámetro del derrame. Generalmente los derrames se consideran circulares, pero en caso de que el derrame se encuentre contenido en estructuras rectangulares o cuadradas, se puede utilizar un diámetro equivalente.

$$\frac{H}{D} = 42 \left(\frac{m_B}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61} \quad (4.22)$$

Donde:

H: Altura visible de la flama (m)

D: Diámetro equivalente del derrame (m)

ρ_a : Densidad del aire (kg/m³ a 20°C y 1 atm)

g: Aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

Factor de vista geométrico

El factor de vista geométrico para una fuente puntual da un estimado del flujo recibido a distancias alejadas de la fuente y se determina con la ecuación 4.23.

$$F_r = \frac{1}{4\pi x^2} \quad (4.23)$$

Donde:

F_r : Factor de vista de la fuente puntual ($1/m^2$)

x : Distancia de la fuente puntual al receptor (m)

Flujo térmico recibido

El flujo térmico (ecuación 4.24) está en función de la energía total del proceso de combustión y se calcula utilizando el modelo de radiación para una fuente puntual.

$$E_r = \tau_a Q_r F_p = \tau_a \eta m_B \Delta H_c A F_p \quad (4.24)$$

Donde:

E_r : Flujo radiante recibido por el receptor (W/m^2)

τ_a : Transmisividad atmosférica (adimensional)

Q_r : Energía total de la combustión (J/s)

η : Fracción de la energía de combustión radiada (entre 0.15 y 0.35)

A : Área total del derrame (m^2)

La radiación térmica es un fenómeno resultado de la ocurrencia de los escenarios de explosión e incendio, el cual puede ser perjudicial para las personas expuestas. Para calcular los efectos de radiación es importante considerar el tiempo de exposición y la intensidad de radiación. La dosis térmica se puede determinar con la ecuación 4.25.

$$Dosis = tq^{4/3} \quad (4.25)$$

Donde:

t : Tiempo de exposición (s)

q : Intensidad de radiación (W/m^2)

En la tabla 4.3 se muestran algunos de los efectos estudiados de la radiación térmica sobre la piel en función del nivel de intensidad y el tiempo de exposición.

Tabla 4.3. Criterios de lesiones por quemadura debido a la radiación térmica.

Intensidad de radiación (kW/m ²)	Tiempo para dolor severo (s)	Tiempo para quemadura de 2° grado (s)
1	115	663
2	45	187
3	27	92
4	18	57
5	13	40
6	11	30
8	7	20
10	5	14
12	4	11

Fuente: (Dinámica Heurística, 2007).

4.3.3 Dardo de fuego (jet fire)

Los dardos de fuego son causados por la emisión turbulenta de materiales contenidos a presión. El modelo para calcular la longitud de la flama de este tipo de eventos, está dado por la ecuación 4.26.

$$\frac{L}{d_j} = \frac{5.3}{C_T} \sqrt{\frac{T_f/T_j}{\alpha_T} \left[C_T + (1 - C_T) \frac{M_a}{M_f} \right]} \quad (4.26)$$

Donde:

L: Longitud de la flama turbulenta visible medida desde el punto de ruptura (m)

d_j: Diámetro del chorro (se considera el diámetro físico de la boquilla) (m)

C_T: Fracción de concentración molar del combustible en una mezcla estequiométrica aire-combustible (adimensional)

T_f: Temperatura de la flama adiabática (K)

T_j: Temperatura del chorro (K)

α_T: Moles del reactivo por moles del producto para una mezcla aire-combustible (adimensional)

M_a : Peso molecular del aire (g/mol)

M_f : Peso molecular del combustible (g/mol)

El cálculo de la radiación emitida por este fenómeno se determina mediante ecuaciones similares a las descritas para incendios de charco.

4.3.4 Lllamarada (Flash Fire)

La llamarada es un tipo de incendio que ocurre cuando una masa de vapor inflamable encuentra un punto de ignición, llevándose a cabo una deflagración. El efecto de mayor preocupación por este tipo de eventos es la radiación emitida (González, 2011).

La intensidad de radiación térmica efectiva se puede calcular mediante la ecuación 4.27 (CENAPRED, 2001):

$$I_r = \sigma(T_g^4 - T_a^4) \quad (4.27)$$

Donde

I_r : Intensidad de radiación térmica efectiva (W/m²)

T_a : Temperatura absoluta del medio ambiente (K)

T_g : Temperatura absoluta del gas caliente (K)

4.3.5 Nubes explosivas

Al ser liberada una sustancia peligrosa inflamable, ya sea como líquido o gas, por evaporación puede formarse una nube con características explosivas que dependen de la sustancia en cuestión. Para el cálculo de las consecuencias de este tipo de fenómeno se utiliza comúnmente el método equivalente en peso de trinitrotolueno (TNT), ya que es un explosivo común utilizado en la minería, el cual ha sido estudiado y se cuenta con información tabulada que permite predecir patrones de daño relacionando las cantidades del material involucrado (González, 2011).

La evaluación de consecuencias para nubes explosivas se desarrolla utilizando una serie de ecuaciones que contienen parámetros que están en función de las propiedades fisicoquímicas de la sustancia inflamable, tal como: punto de ebullición, calor de vaporización, densidad, calor específico, límites de explosividad, entre otros. Los modelos que se describirán a continuación determinan la fracción y peso de material en la nube, diámetro y energía desprendida.

El peso del material en la nube (ecuaciones 4.28 y 4.29) se determina tomando en cuenta el estado físico del material.

Para gases

$$W_G = 0.002785MV_G \quad (4.28)$$

Para líquidos

$$W_L = 8.35\rho V_L \quad (4.29)$$

Un aspecto importante a considerar es la temperatura de ebullición del material, pues si ésta se encuentra por debajo o por arriba de la temperatura ambiental, el peso del material en la nube varía con respecto a parámetros termodinámicos del mismo (ecuaciones 4.30 y 4.31).

$$\text{Si } T_2 < 21.1^\circ\text{C} \text{ entonces } W = W_G = W_L \quad (4.30)$$

$$\text{Si } T_2 > 21.1^\circ\text{C} \text{ entonces } W = W_L = \frac{C_p(T_1 - T_2)}{\Delta H_v} \quad (4.31)$$

Donde:

W_G : Peso del gas (lb)

W_L : Peso del líquido (lb)

ρ : Densidad del material (g/ml)

V_L : Volumen del líquido (gal)

V_G : Volumen del gas en condiciones normales (ft³)

T_1 : Temperatura del proceso (°C)

T_2 : Temperatura de ebullición (°C)

C_p : Calor específico (Cal/g°C)

ΔH_v : Calor de vaporización del líquido a su temperatura de ebullición (Cal/g)

La fracción del material en la nube se calcula utilizando los límites superior e inferior de explosividad de la sustancia, empleando la ecuación 4.32.

$$v = \frac{LEL + UEL}{2(100)} \quad (4.32)$$

Donde:

v: Fracción del material en la nube (adimensional)

LEL: Límite inferior de explosividad (%)

UEL: Límite superior de explosividad (%)

El diámetro y la energía desprendida por la nube del material inflamable, son parámetros importantes que describen tanto las dimensiones de la nube como la cantidad de energía que puede causar daños en el entorno, mismas que se calculan mediante las ecuaciones 4.33, 4.34 y 4.35.

$$D_c = 7.017 \sqrt{\frac{W}{M}} \quad (4.33)$$

Si $h > 10$ ft

$$D_c = 22.19 \sqrt{\frac{W}{hM}} \quad (4.34)$$

Donde:

M: Peso molecular (g/mol)

h: Altura de la nube (ft)

Para el cálculo de la energía desprendida se supone un daño máximo probable utilizando el modelo de equivalente de TNT.

$$W_{TNT} = \alpha \frac{W_c \Delta H_c}{\Delta H_{TNT}} \quad (4.35)$$

Donde:

W_c : Masa de la sustancia liberada a la atmosfera (kg)

W_{TNT} : Masa de trinitrotolueno equivalente (kg)

ΔH_c : Calor de combustión (J/kg)

ΔH_{TNT} : Energía de onda de choque del TNT (J/kg)

α : Factor de rendimiento de la explosión (adimensional)

Una vez obtenida la masa equivalente de TNT, se puede calcular la distancia escalada con la expresión 4.36 (Casal, 2008):

$$d_n = \frac{d}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (4.36)$$

Donde:

d_n : Distancia escalada ($m/kg^{1/3}$)

d : Distancia real del centro de la explosión al punto en el cual se desea conocer la sobrepresión generada (m)

Utilizando la distancia escalada se puede obtener valores de sobrepresión por métodos gráficos o mediante la ecuación 4.37, la cual involucra la distancia escalada (Casal, 2008).

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{1}{d_n} + \frac{4}{d_n^2} + \frac{12}{d_n^3} \quad (4.37)$$

Donde:

ΔP : Sobrepresión (Pa)

P_0 : Presión atmosférica (Pa)

Otra forma de determinar la sobrepresión por explosión de una nube de contenido inflamable se tiene utilizando un método gráfico donde se relaciona la distancia para una explosión donde la cantidad de masa equivalente en TNT es conocida, obteniendo así la sobrepresión y el impulso generado por el evento (Casal, 2008).

Por otro lado, se han hecho estudios sobre el daño que podría presentarse dependiendo del nivel de presión generado por la liberación directa de un material peligroso a la atmósfera o a partir de líquidos en ebullición o evaporación que pueden generar condiciones de sobrepresión en un área determinada. En la tabla 4.4 se muestra un estimado de los daños por sobrepresiones máximas formadas por encima de la presión atmosférica normal debido a ondas de choque o impacto en explosiones con materiales peligrosos.

Tabla 4.4. Estimado de daños por sobrepresión en explosiones.

Sobrepresión (psi)	Daño esperado
0.03	Ruptura ocasional de ventanas grandes que ya se encuentren bajo tensión.
0.04	Ruido elevado (143 dB); fallas en vidrios debido al estallido.
0.10	Ruptura de ventanas pequeñas bajo tensión.
0.15	Presión típica para fallas en vidrio.
0.30	Cierto daño en techos de casas, 10% de rupturas en vidrios de ventanas.
0.40	Daño estructural menor.
0.50 - 1	Ventanas destrozadas generalmente, algunos marcos de ventanas dañados.
0.7	Daños menores para estructuras en casas.
1	Demolición parcial de casas, éstas se vuelven inhabitables.
1 - 2	Paneles de metal desfasados y doblados.
1 - 8	Rango de lesiones leves a serias debido a laceraciones de la piel por lanzamiento de proyectiles.
1.3	Ligera distorsión en edificios con estructuras de metal recubiertas.
2	Colapso parcial de muros y techos de casas.
2 - 3	Destrucción de muros de concreto no reforzado.
2.3	Límite inferior de daño estructural grave
2.4 – 12.2	Rango de 1-90% de ruptura de tímpano entre las personas expuestas.
2.5	50% de destrucción de casas de ladrillo.
3	Desfasamiento de estructuras de acero desde sus cimientos.
3 - 4	Edificios de paneles de acero sin marco.
4	Grietas en recubrimientos de edificios industriales.
5	Armazón de madera destrozada.
5 - 7	Destrucción casi completa de casas.
7	Volcadura de vagones de tren cargados.
7 - 8	Fallo en estructuras de ladrillos no reforzadas de 8-12 pulgadas de espesor por corte de las juntas.
9	Demolición de contenedores de ferrocarril con carga.
10	Posible destrucción total de edificios.
14.5 - 29	Rango de 1- 99% de fatalidades entre las personas expuestas debido a los efectos directos del estallido.

Fuente: (Dinámica Heurística , 2012).

5 CASO ESTUDIO: ESCUELA DE CAPACITACIÓN DE BRIGADAS DE EMERGENCIA (ECBE)

5.1 Descripción del sitio y ubicación geográfica

El presente trabajo se desarrollará en la Escuela de Capacitación de Brigadas de Emergencia (ECBE), la cual es una institución enfocada en la capacitación y entrenamiento de personal laboral en la industria, aplicando técnicas para dar respuesta en el control y manejo de emergencias; y depende de la Dirección de Medio Ambiente, Seguridad e Higiene de la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ). Las instalaciones de dicha institución están ubicadas en la ciudad de Celaya, Guanajuato, en el centro de México (ECBE, 2014).

La ciudad de Celaya está localizada dentro del “Bajío Montañoso”. Su altura comprende 1,752 m sobre el nivel del mar y tiene una temperatura mínima de 16°C y una máxima de 25.5°C, contando con una temperatura media anual de 20.85°C. El clima oscila entre semiseco y semicálido con una precipitación pluvial promedio de 575.3 mm anuales; clima según Köppen, modificado por E. García (SEGOB , 2010).

La corriente hidrológica del municipio es, principalmente, el río Laja, el cual nace en el municipio de San Felipe recorre Dolores Hidalgo y Allende, para penetrar a través de Comonfort por el norte del municipio de Celaya fluyendo por el oriente de la ciudad, de manera que cruza longitudinalmente la ciudad de norte a sur; de ahí gira al poniente para desembocar en el río Lerma (SEGOB , 2010).



Figura 5.1. Ubicación geográfica de Celaya, Guanajuato (SEGOB , 2010).

Las condiciones meteorológicas promedio de la ciudad, según la Estación Meteorológica ubicada al norte de Celaya con latitud de 20°32'05" y longitud 100°48'49", se encuentran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Datos meteorológicos.

Parámetro	Valor
Velocidad del viento	10 km/h
Dirección del viento dominante	Del Este
Humedad relativa	57%
Temperatura	20.85°C

Fuente: Estación meteorológica de Celaya, Guanajuato, 2013.

5.2 Justificación de la selección del sitio

La ECBE es una institución que imparte cursos de especialización principalmente en cuatro áreas, que son:

- Operaciones contra incendio
- Rescate en espacios confinados y en alturas
- Atención y control de emergencias con materiales peligrosos y,
- Primeros auxilios.

Estos cursos se imparten en diferentes categorías, en instalaciones cuya escala permiten capacitarse en situaciones apegadas a la realidad, esto con el fin de garantizar un alto nivel de seguridad y calidad en la capacitación de las brigadas de emergencia. Como parte de las actividades contra incendio, se utilizan combustibles los cuales se encuentran almacenados en tanques de gran capacidad. Puesto que cada año se realizan diversas prácticas, la ECBE recibe a un gran número de personas provenientes de plantas industriales de México, así como de países de Centro y Sudamérica, que desean adquirir cierta habilidad para responder en caso de situaciones de emergencia, quedando expuestas a posibles accidentes causados por el almacenamiento de combustibles que por sus características fisicoquímicas, pueden ser precursores de una catástrofe que puede afectar al personal expuesto, alrededores e instalaciones. Debido a lo anterior, es importante estimar los radios de posible afectación, en caso de que los tanques de almacenamiento de combustible estallen, para proporcionar medidas de prevención que permitan a la empresa saber cómo actuar para minimizar el riesgo por manipulación de combustibles.

5.3 Historia de ECBE

Para la redacción de la historia de la ECBE, se contactó a Rocha, 2014.

En 1986, el Corporativo de Seguridad de Celanese México, una empresa dedicada al desarrollo de tecnología y materiales especializados para la industria, plantea la idea de formar una escuela de brigadas de emergencia, la cual surge de la necesidad de capacitación del personal con el que contaba Celanese en las 10 plantas químicas distribuidas en el país, para atender situaciones de emergencia.

Durante aproximadamente 4 años, se planeó cómo formar la institución que llevaría el título de “Escuela de Capacitación de Brigadas de Emergencia” (ECBE), partiendo del análisis realizado en los campos de prácticas con los que contaba la empresa, los cuales no tenían instalaciones sólidas, se llegó a la conclusión de que el campo idóneo era el que se tenía en Celaya, Guanajuato. Se necesitaba una gran inversión para iniciar la construcción de la escuela de capacitación, pero afortunadamente se contaba con donativos de las plantas químicas de Celanese Mexicana.

En 1990, dicho campo se comenzó a adecuar sobre la base de un criterio ecológico pues se sabía que las prácticas contra incendio generarían “humo” por lo cual se planeaba disminuir la emisión, además de evitar la contaminación del subsuelo por hidrocarburos.

Se comenzó construyendo fosas de cemento para crear una especie de pequeñas albercas que contendrían el combustible, pero hacía falta algo más. Por lo que, el Corporativo de Seguridad, basó el desarrollo de la institución sobre la idea de que para formar una escuela de calidad se necesitaban: Instalaciones seguras, equipos de seguridad e instructores altamente calificados. Para lo cual, el corporativo trabajó arduamente, haciendo análisis, diseñando las instalaciones, así como las actividades que se realizarían dentro de ellas.

El diseño, tanto de las instalaciones como de las actividades que se realizarían en ellas, se basó en ideas tomadas de las escuelas de capacitación de Texas A&M (The Agricultural and Mechanical College of Texas) y ANSUL (ANhydrous SULfur dioxide), instituciones reconocidas a nivel mundial por su alto nivel en capacitación de personal industrial, ubicadas en Estados Unidos de América.

Se planeó hacer la escuela por módulos, una parte para prácticas contra incendio y otra para fuegos estructurales, en esta última se tenían estaciones de carga y descarga con una pipa y estructuras que simulaban plantas químicas de tres niveles, donde el diámetro del orificio de fuga era reducido para acelerar el flujo de combustible, debido a que no se quería generar mucho “humo”, pero sí mucho calor por la presión a la que circulaba el gas.

La construcción de las instalaciones de simulación, se realizó con material que se desechaba de las plantas químicas de Celanese Mexicana. Cabe mencionar, que los tanques de almacén de combustible también surgieron del reúso de material pero con un debido mantenimiento.

Después, surgieron más ideas sobre el diseño de las prácticas, por diversos cursos que se organizaban entre Celanese Mexicana y varias empresas de México, creándose así una práctica de comando de incidentes con materiales peligrosos la cual consistía de un carro tanque volteado en el cual se simulaba el escape de sustancias químicas.

Aunque se pretendía hacer prácticas de primeros auxilios, se dieron cuenta que se tenía conocimiento más sólido en prácticas contra incendio, materiales peligrosos y rescate, que en primeros auxilios pues no contaban con personal capacitado en esa área por lo que se decidió manejar, ese tipo de práctica, con la Cruz Roja Mexicana.

Lo último que se desarrolló en la ECBE, perteneciendo a Celanese Mexicana, fue el área de prácticas que consistía en apagar fuego por medio de extintores.

Después de un par de años, se contaba con un centro de capacitación debidamente equipado, además de contar con aulas, regaderas, comedor y una cancha de fútbol para acondicionamiento físico.

El proyecto generaba muchos gastos de mantenimiento por lo cual no era rentable pero cumplía con el objetivo de formar brigadas de emergencia con un alto nivel en capacitación.

En el 2000, la ECBE pasa a ser parte de la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ) conservando las instalaciones (excepto la cancha de fútbol para acondicionamiento físico) y el concepto manejado por Celanese Mexicana. La escuela de capacitación tiene una antigüedad de 24 años y actualmente depende de la Dirección de Medio Ambiente, Seguridad e Higiene de la ANIQ. La institución cuenta con el reconocimiento como Centro de Evaluación y Certificación de Brigadas a nivel nacional, de acuerdo a la norma de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social: NOM-002-STPS-2001 (Morales, 2014).

5.4 Estructura administrativa de ANIQ-ECBE

La estructura administrativa de la Asociación Nacional de la Industria Química (figura 5.2) parte de una Dirección General que coordina las áreas de: Medio Ambiente, Seguridad e Higiene, Dirección de Comercio Exterior, Sistema de Becarios, Gerencia de Logística, Instituto para la Competitividad de la Industria Química (ICIQ), Gerencia

de Sistemas y Gerencia de Administración. La ECBE, Medio Ambiente, Seguridad e Higiene, son áreas coordinadas por la Dirección de Medio Ambiente, Seguridad e Higiene. La Escuela de Capacitación cuenta a su vez con cuatro departamentos que son: Operación y Mantenimiento, Instrucción, Comercialización, Factura y Cobranza, los cuales trabajan en conjunto para lograr que los eventos de capacitación se lleven a cabo de manera segura.

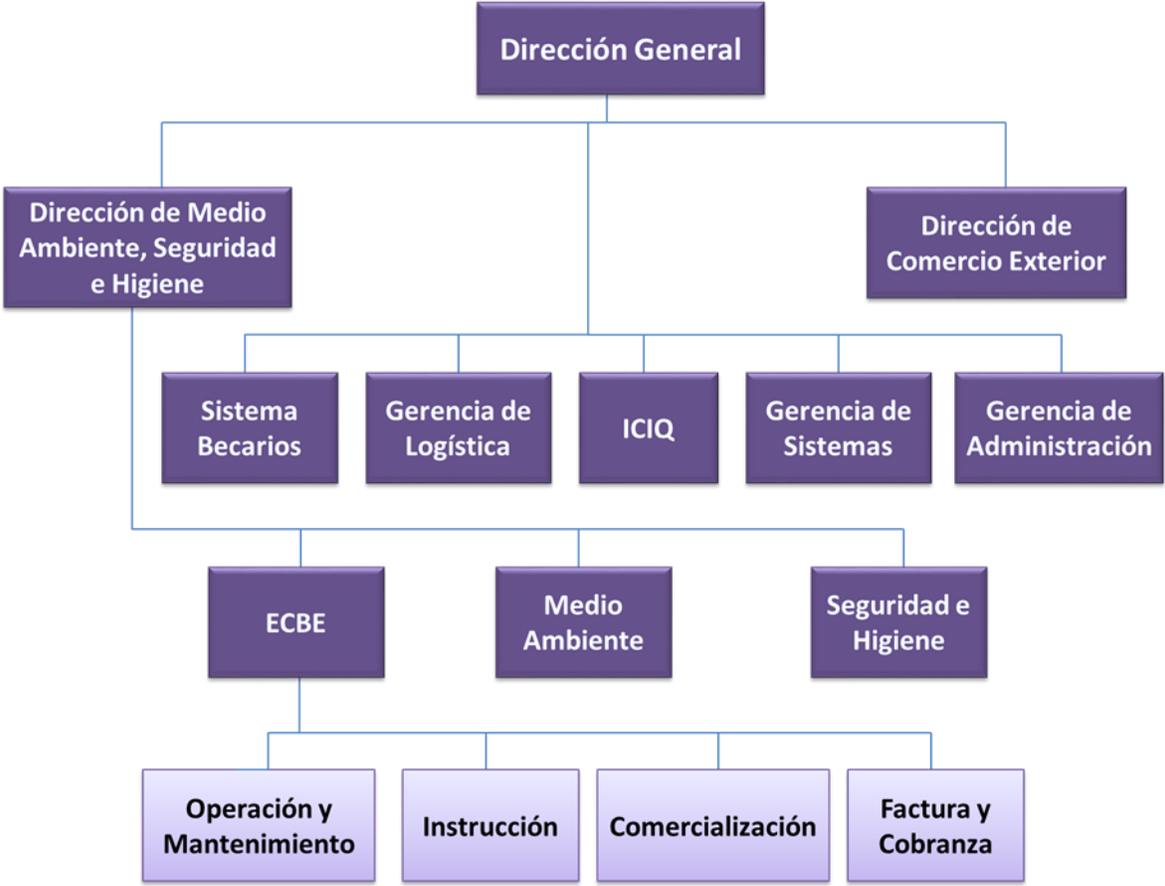


Figura 5.2. Organigrama ANIQ-ECBE (Morales, 2014).

5.5 Descripción de las actividades que se realizan en el sitio

Las actividades que se realizan en ECBE son referentes a la capacitación y entrenamiento de personal que labora en la industria, principalmente. También se realizan torneos de brigadas, así como eventos especiales de certificación en atención a emergencias en: Operaciones contra incendio, rescate en espacios confinados y en alturas, atención y control de emergencias con materiales peligrosos y primeros auxilios. En cada área se tienen a su vez diferentes tipos de eventos.

Operaciones contra incendio

El objetivo de las operaciones contra incendio es que el participante adquiera conocimientos y habilidades para planear, organizar e implementar acciones de respuesta ante un incendio en cualquiera de sus fases, y poder tomar decisiones pertinentes ante la eventualidad de una emergencia para lograr el control de la misma en el menor tiempo posible.

En esta área se pretende que el equipo de brigadistas desarrolle habilidades en:

- Realizar maniobras con mangueras con chorro a presión.
- Tendido y enrollado de mangueras contra incendio
- Técnicas para avance y retroceso del personal
- Coordinación y control en el manejo de cada uno de los chorros de agua utilizados para el combate de un incendio.
- Aplicación de técnicas de colocación y uso del equipo de protección personal para bomberos.
- Conocimiento y técnicas de manejo del equipo de Respiración autónomo.
- Técnicas seguras para el manejo de extintores (polvo químico seco y bióxido de carbono) para el control de fuegos incipientes.
- Desarrollar el Sentido de la orientación y manejo del estrés al usar equipo de Respiración autónomo, en el combate a incendios estructurales en interiores y/o exteriores, así como en la búsqueda y rescate de lesionados.

El equipo de protección personal que utiliza el participante (figura 5.3) es un traje de bombero integrado por: Casco, monja, chaquetón, guantes, pantalón y botas.



Figura 5.3. Equipo de protección personal para operaciones contra incendio.

Dentro del área contra incendio se tienen diferentes proyectos en los cuales se aplican técnicas específicas así como diferentes tipos de agentes extintores. Los principales proyectos son: *Árbol de navidad* y *bridas*, *torre de destilación*, *punto de carga*, *fosa de drenaje* y *casa de humo*, mismos que son descritos a continuación.

Árbol de navidad y bridas

El objetivo de este proyecto es aplicar las técnicas y conocimientos en el manejo de mangueras, boquillas y chorros de agua para realizar el ataque y control de un fuego clase “B”, el cual se refiere a fuegos de líquidos inflamables o combustibles (figura 5.4). En este caso se utiliza Gasolina y Gas L.P. como combustibles y como agente extintor, agua.



Figura 5.4. Proyecto *árbol de navidad y bridas*.

Torre de destilación

La *torre de destilación* es una estructura utilizada para la simulación de un incendio en una industria, donde el participante aplica técnicas y conocimientos del manejo de mangueras y boquillas para controlar el suceso, asegurando la protección de los brigadistas al subir a cerrar la válvula de combustible localizada en el cuerpo de la torre (figura 5.5). Se utilizan como combustibles la Gasolina y el Gas L.P.



Figura 5.5. Proyecto torre de destilación.

Puente de carga

La estructura de puente de carga (figura 5.6) es una zona donde se simula un incendio ocasionado por la carga y descarga de materiales líquidos inflamables y/o sustancias químicas. El objetivo de esta actividad es que los brigadistas se organicen y coordinen para eliminar fugas de combustibles (Gasolina, Diésel y Gas L.P.), controlar y extinguir el fuego.



Figura 5.6. Proyecto puente de carga.

Fosa de drenaje

La fosa de drenaje (figura 5.7) es un área donde el brigadista aprende técnicas de control y extinción de un fuego incipiente, tipo “B”, en una zona de drenajes, utilizando como combustibles la Gasolina y el Diésel, y en este caso, se emplea polvo químico seco como agente extinguidor.



Figura 5.7. Proyecto fosa de drenaje.

Casa de Humo

La casa de humo (figura 5.8) es una estructura diseñada para llevar a cabo la simulación en el combate de un incendio estructural (en interiores), así como la búsqueda y rescate de lesionados. El brigadista desarrolla el sentido de orientación y manejo de estrés al usar el equipo de respiración autónomo.



Figura 5.8. Proyecto Casa de Humo.

Rescate en espacios confinados y en alturas

Las actividades que se desarrollan en esta área se basan en estructuras diseñadas a semejanza de la industria, donde el participante implementa técnicas de seguridad del personal para efectuar rescates utilizando equipos de ventaja mecánica (figura 5.9). El objetivo de esta área es que las brigadas de emergencia adquieran habilidades en:

- Identificar y evaluar riesgos que pueden generarse en un espacio confinado.
- Las medidas preventivas que debe considerar antes, durante y después del rescate así como el uso del equipo de protección personal adecuado y manejo de equipo adicional.



Figura 5.9. Actividades de rescate.

Atención y control de emergencias con materiales peligrosos

En esta área se desarrollan diferentes proyectos, tales como: control de fugas en tuberías (figura 5.10), autotanques volteados e intercambiadores de calor (figura 5.11); cuyo objetivo es responder a liberaciones o posibles liberaciones de materiales peligrosos con el fin de evitarlas o controlarlas. Las habilidades que desarrollan los participantes se enfocan en:

- Identificar y evaluar riesgos que pueden ocasionar emergencias.
- Manejar la información contenida en la Guía de Respuesta en Caso de Emergencia, la cual contiene información referente a materiales peligrosos, sus riesgos y precauciones que se deben tomar para su control y manejo.

- Identificar las acciones a realizar en caso de emergencia, utilizando las hojas de datos de seguridad de los materiales que se utilizan en diversos procesos industriales.
- Medidas preventivas que se deben considerar antes, durante y después del control y corrección de una emergencia con materiales peligrosos, así como el equipo de protección personal que debe utilizarse.

El equipo de protección personal utilizado para este tipo de actividades, es un traje encapsulado con equipo de respiración autónomo, casco y botas .



Figura 5.10. Equipo de protección personal para control de emergencias con materiales peligrosos.



Figura 5.11. Proyecto de control de fugas en intercambiadores de calor.

Primeros Auxilios

Las prácticas de primeros auxilios (figura 5.12) se imparten con el fin de que el brigadista adquiera conocimientos y habilidades para dar respuesta en forma eficiente y segura ante la presencia de una emergencia médica y mantener estable a la persona lesionada, en tanto intervienen los servicios médicos de urgencia, mediante el empleo de técnicas de movilización y empaquetamiento del lesionado, o en su caso, técnicas de reanimación y respiración artificial.



Figura 5.12. Actividades de primeros auxilios.

5.6 Sustancias que se manejan en el sitio

En las actividades de capacitación contra incendio, la ECBE utiliza tres tipos de combustibles: Diesel, Gasolina y Gas L.P. Los proveedores de combustibles son empresas situadas en la ciudad de Celaya, el Diesel lo provee LUPEQSA, S.A. de C.V.; el Gas L.P., la Distribuidora de Gas Noel, S.A. de C.V.; la Gasolina, la Estación de Servicio Bonanza S.A. de C.V.

También se utilizan como agentes extintores, polvo químico seco y bióxido de carbono. Las principales características de estas sustancias se describen a continuación.

Diesel

Este combustible se deriva de la destilación atmosférica del petróleo crudo. Es obtenido de una mezcla compleja de hidrocarburos parafínicos, olefínicos, nafténicos y aromáticos. Es un líquido insoluble en agua y de olor a petróleo (SENER, 2014).

Entre sus principales características físicas están su punto de inflamación el cual es superior a 60°C, y rangos de ebullición de 163°C a 371°C aproximadamente (ANEXO

1). Cuando el diesel es tratado puede emitir vapores que forman mezclas inflamables con el aire (Kraus, 1998).

Por ser un combustible de destilación, tiene cualidades como los puntos de inflamación y goteo controlados, combustión limpia, la ausencia de formación de depósitos en los tanques de almacenamiento y un índice de cetano de gasóleo diesel adecuado para que exista una combustión satisfactoria (Kraus, 1998).

Gasolina

La gasolina es una mezcla de fracciones de hidrocarburos con puntos de ebullición relativamente bajos (SENER, 2014).

Tiene puntos de ebullición que van desde temperaturas ambiente hasta 204°C y un punto de inflamación inferior a -40°C. Los aspectos críticos de este combustible son el índice octano (cualidad antidetonante), la volatilidad y la presión de vapor, la cual es un parámetro importante para el control ambiental (ANEXO 2). Los vapores de gasolina son más pesados que el aire y pueden recorrer grandes distancias y alcanzar fuentes de ignición una vez liberados en las operaciones de llenado, por derrame, rebosamiento o reparación (Kraus, 1998).

Los principales aditivos de la gasolina son el plomo tetraetilico (PTE) y el plomo tetrametilico (PTM) los cuales sirven para mejorar el rendimiento de la gasolina y proporcionar protección frente a la oxidación y la corrosión, así como mejorar los índices octano y sus cualidades antidetonantes. En la actualidad, estos aditivos ya no se utilizan habitualmente, debido a la presencia de plomo en los mismos. Por lo cual, para reducir las emisiones de monóxido de carbono y mejorar las cualidades de la gasolina sin plomo, se utilizan aditivos como: Etilbutiléter terciario (EBET), metilbutiléter terciario (MBET), amilmetiléter terciario (AMET) y otros compuestos oxigenados (Kraus, 1998).

Gas L.P.

El gas de petróleo licuado (Gas L.P.) está constituido por mezclas de hidrocarburos parafínicos y olefínicos, como el propano y el butano. Es almacenado en fase líquida bajo presión (Kraus, 1998).

En condiciones normales de presión, la temperatura de ebullición del Gas L.P. es de -32.5 °C y una temperatura de auto-ignición de 435 °C (ANEXO 3). Es incoloro y sus vapores son más pesados que el aire y extremadamente inflamables.

Cuando existe una fuga de este combustible a la atmósfera, éste vaporiza de inmediato, se mezcla con el aire y se forman nubes inflamables y explosivas, que al exponerse a una fuente de ignición pueden producir un incendio o explosión (ANEXO 3).

Polvo químico seco

El polvo químico seco está formado por sales sódicas o potásicas, en fase sólidas finamente divididas que extinguen el fuego por sofocación e inhibición de cadena, debido a que rompe las reacciones que se generan en la combustión al interponer catalizadores negativos que neutralizan los radicales libres, deteniendo las reacciones (INSHT, 1984).

Dióxido de Carbono

El dióxido de carbono es utilizado para extinguir fuegos de tipo "B", los cuales son debidos a líquidos y gases inflamables, principalmente. Es utilizado en espuma. La función de esta sustancia es evitar que el combustible entre en contacto con el oxígeno del aire, y de esa manera se extingue el fuego por sofocación, pues al formar una capa alrededor del incendio, lo que se hace es aislar el fuego del aire. Esta sustancia se almacena en un extintor, el cual es un recipiente bajo presión (INSHT, 1984).

6 METODOLOGÍA

Con el fin de llevar a cabo la simulación de los posibles radios de afectación por almacenamiento de sustancias peligrosas en el sitio que es objeto de estudio, se propone la siguiente metodología (ver figura 6.1):

- Efectuar estudios de campo para recaudar información sobre el sitio, con la finalidad de conocer el área y las actividades que se realizan de tal manera que se puedan identificar las sustancias peligrosas que se manejan.
- Localizar en un mapa interno del sitio las zonas que pueden representar un peligro, así como identificar las zonas aledañas que pudieran ser afectadas. Realizar un estudio más detallado en la zona con mayor peligro empleando la técnica de Análisis Preliminar de Peligros.
- Analizar las condiciones meteorológicas de la zona, durante un periodo mínimo de un año (datos meteorológicos del año 2012).
- Familiarizarse con los programas SCRI, ALOHA y EFFECTS, que permiten calcular las zonas de afectación ya que será necesario saber qué información se le tendrá que suministrar para que cumplan su función.
- Proponer los posibles escenarios por fugas de sustancias peligrosas de acuerdo a las condiciones de almacenamiento y propiedades fisicoquímicas de las mismas, elaborando un Árbol de sucesos.
- Realizar el análisis de consecuencias mediante simulaciones para determinar los radios de afectación utilizando el programa SCRI (Simulación de Contaminación y Riesgos Industriales), para los diferentes escenarios meteorológicos. Una vez identificadas las condiciones meteorológicas que resultan en escenarios críticos, se procede a la simulación de dichos escenarios accidentales con los programas ALOHA y EFFECTS, para la comparación de resultados.
- Medir el nivel de riesgo individual de la instalación.
- Proporcionar medidas de prevención pertinentes al área estudiada.

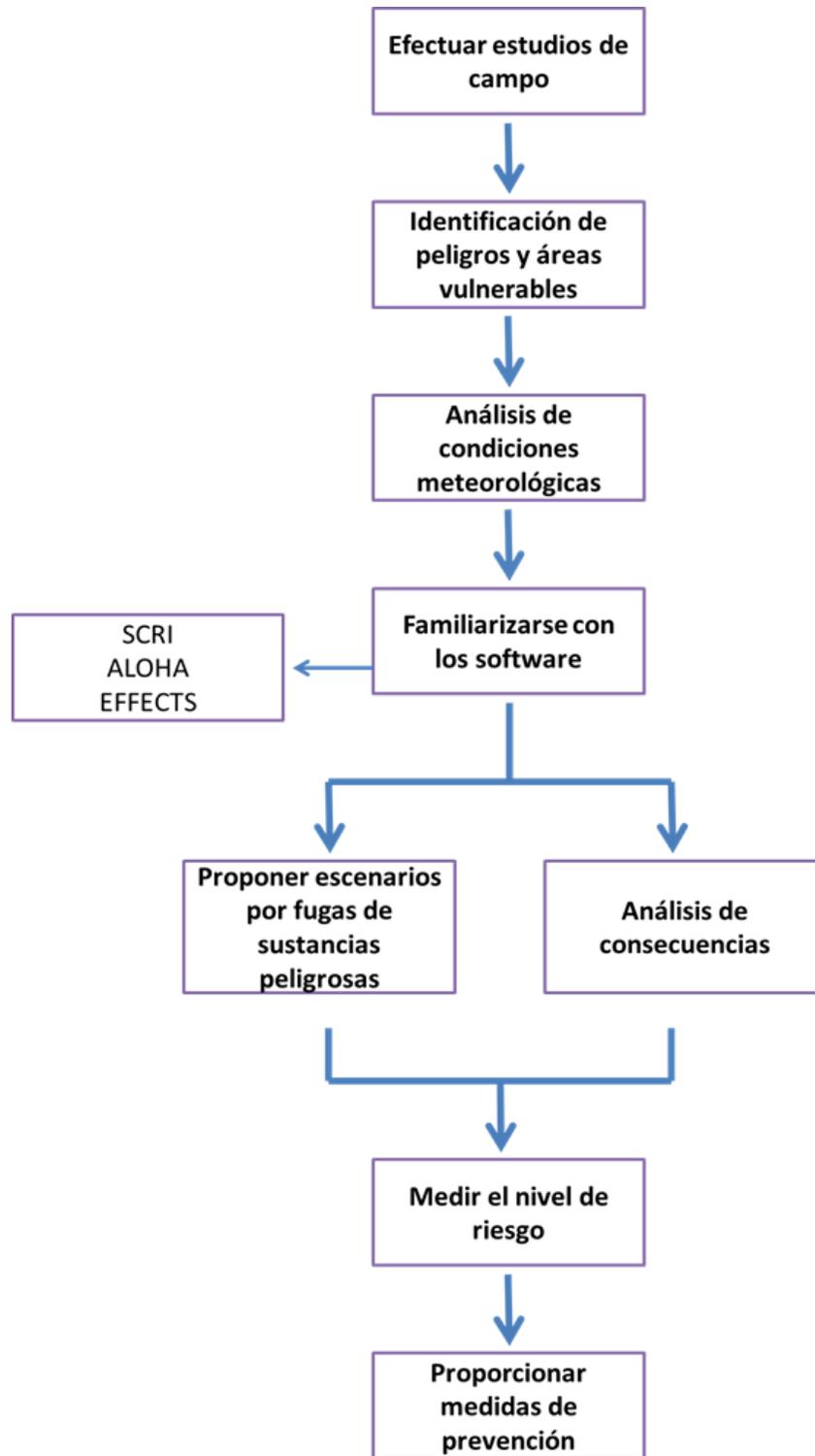


Figura 6.1. Metodología para la simulación de radios de afectación.

7 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

7.1 Estudios de campo

La ECBE consta aproximadamente de 7.5 ha (Morales, 2014) y está rodeada por: el río Laja (al Norte), comunidades Mancera y El Cuije (al oriente), población y una gasolinera a 3 km (al sur), y la localidad Michinelas (al poniente). La delimitación de la zona se encuentra representada en la figura 7.1.



Figura 7.1. Delimitación de la zona de estudio.

Los estudios de topografía de Celaya indican que el 18.50% del municipio tiene pendientes mayores al 4%, mientras que el 81.50 % restante tiene una pendiente menor, por lo que la mayor parte del municipio es considerado una planicie (Gobierno de Celaya, 2009).

Los tipos de suelos que predominan en el municipio son Vertisol Pelico, Feozem Haplico y en menor medida Litosol. Los vertisoles son de textura arcillosa y de color negro, dando lugar a suelos con alta permeabilidad. Los feozem son fértiles y ricos en materia orgánica, óptimos para el cultivo de granos y hortalizas (Gobierno de Celaya, 2009).

Además de conocer las condiciones del suelo, la delimitación y topografía del sitio, el estudio de campo implica conocer las sustancias peligrosas que se manejan en el mismo, ya que será primordial su identificación para el desarrollo del proyecto.

De las sustancias que se utilizan en las actividades de la ECBE, los combustibles para la capacitación contra incendios, son unas de las principales sustancias que se obtienen a partir de la refinación de petróleo e implican un riesgo intrínseco de incendio

y explosión, pues de acuerdo a la NOM-002–SCT/2011, que especifica el listado de las sustancias y materiales peligrosos usualmente transportados, la Gasolina y el Diesel tienen una clase de riesgo tipo 3, la cual los define como líquidos inflamables, y para el Gas L.P. la clase de riesgo es 2.1 la cual indica que es un gas inflamable y puede crear atmósferas explosivas (DOF, 2011).

Tabla 7.1. Clase de riesgo de las sustancias que se manejan en el sitio.

Sustancia	Clase de riesgo	Definición
Diesel	3	Líquido inflamable
Gasolina	3	Líquido inflamable
Gas L.P.	2.1	Gas inflamable

7.2 Identificación de peligros y áreas vulnerables

Las áreas que pueden considerarse como peligrosas, en la ECBE, se encuentran localizadas en el mapa de peligros (ANEXO 4), y son: las áreas de almacén de combustibles, subestación eléctrica, taller de mantenimiento, edificio de compresores, áreas de actividades contra incendio y el área de baños. En estas áreas se involucran actividades que son peligrosas por las características de las sustancias que se emplean, así como de las maniobras que se realizan.

En el área de baños, existe un boiler que tiene como función principal calentar agua de servicio, el cual implica peligro de explosión, debido a que utiliza gas natural para generar la energía necesaria para cumplir su función.

Se puede distinguir que el área de almacén de combustibles es una de las zonas más peligrosas por las propiedades fisicoquímicas de las sustancias que se almacenan, así como la cantidad de sustancia que se encuentra contenida en los tanques. La capacidad de los tanques se puede observar en la tabla 7.2.

Tabla 7.2. Capacidad máxima y porcentaje de llenado de los tanques que almacenan combustible en el sitio de estudio.

Tanques	Código	Capacidad máxima (L)	Porcentaje de llenado (%)
Gas L.P.	R-612	5,000	85
Diesel	R-524	30,857	50
Gasolina	R-140	7,500	50
	R-526	9,068	
	R-619	1,000	
Mezcla Diesel-Gasolina	R-610	12,000	50
	R-611	12,000	

La Gasolina y el Diesel se encuentran almacenados en tanques atmosféricos de acero al carbono, a diferencia del tanque de Gas L.P. que se encuentra a presión y cuyas especificaciones de almacenamiento se encuentran en la norma oficial mexicana de la Secretaría de Energía, NOM-009-SESH-2011, que especifica los métodos de prueba de los recipientes para contener Gas L.P., de tipo no transportable.

Los tanques de Gasolina y Diesel se encuentran en un dique de concreto reforzado con un área de 272 m². El almacén cuenta con cuatro bombas de succión, un conjunto de tuberías, válvulas y bridas que hacen funcional la conducción de las sustancias hacia las áreas de actividades de capacitación. Como medidas de seguridad, se cuenta con señalamientos y un extintor.

Es importante conocer las características de las sustancias peligrosas en cuestión, debido a que éstas indican cómo pueden comportarse dependiendo de ciertas condiciones en el medio ambiente.

Tabla 7.3. Propiedades fisicoquímicas, características de inflamabilidad y rombo de identificación de las sustancias peligrosas utilizadas en el sitio.

Sustancia	Presión de vapor (mmHg) a 21.1°C	Temperatura de autoignición (°C)	Límite inferior de explosividad (%)	Límite superior de explosividad (%)	Rombo de identificación ***
Diesel*	2.17	176.6 a 329.44	1.3	6	
Gasolina*	382.58	456.11	1.4	7.4	
Gas L.P.**	4500	435	1.8	9.3	

* Las propiedades fisicoquímicas y características de inflamabilidad de la gasolina y el diesel fueron tomadas de la base de datos del programa desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency), CAMEO (Computer-Aided Management of Emergency Operations).

** Los datos del Gas L.P. fueron tomados de la hoja de datos de seguridad (ANEXO 3).

***Revisar nivel de riesgo según la NOM-018-STPS-2000.

En tabla 7.3 se puede observar que la presión de vapor de gas licuado de petróleo es mucho mayor que la de la gasolina y el diesel, lo cual indica que esta sustancia se encontrará en la fase gaseosa a temperatura ambiente y, de encontrarse dentro de los niveles de explosividad y con un aporte de energía, puede causar una explosión. Aunque la gasolina y el diesel tienen una presión de vapor baja a temperatura ambiente, ésta puede aumentar gradualmente con un aumento de temperatura y se tendrán en el medio ambiente vapores altamente inflamables.

Por otro lado, de acuerdo con el nivel de riesgo para las sustancias presentes en la norma de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, el Diesel es un combustible mínimamente peligroso para la salud; la gasolina presenta riesgo de inflamabilidad y es ligeramente peligroso para la salud, mientras que el Gas L.P es extremadamente inflamable y ligeramente peligroso en cuanto a riesgo de salud.

Tabla 7.4. Criterios de clasificación de riesgo según la NOM-018-STPS-2000.

NIVEL DE RIESGO							
RIESGO A LA SALUD		RIESGO DE INFLAMABILIDAD		RIESGO DE REACTIVIDAD		RIESGO ESPECIAL	
4	Severamente peligroso	4	Extremadamente inflamable	4	Puede detonar	OXY	Oxidante
3	Seramente peligroso	3	Inflamable	3	Puede detonar pero requiere fuente de inicio	ACID	Ácido
2	Moderadamente peligroso	2	Combustible	2	Cambio químico violento	ALC	Alcalino
1	Ligeramente peligroso	1	Combustible si se calienta	1	Inestable si se calienta	CORR	Corrosivo
0	Mínimamente peligroso	0	No se quema	0	Estable	w	No use agua

El almacenamiento obedece a las condiciones de compatibilidad de las sustancias de acuerdo a la norma de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte, NOM-010-SCT2/2009, que establece las disposiciones de compatibilidad y segregación para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos, donde especifica que líquidos inflamables y gases inflamables son compatibles (DOF, 2009).

Una vez que se identificaron las partes y características de las sustancias que conforman el almacén, se detectaron puntos de peligro en cada componente empleando la técnica de Análisis Preliminar de Peligros. Ésta consiste en detectar el peligro que puede estar presente en la zona, visualizando sus posibles causas y consecuencias mayores, así como el componente que debe ser monitoreado para

minimizar, en lo posible, la probabilidad de que se desencadene un evento indeseado. Los resultados de dicho análisis se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 7.5. Análisis Preliminar de Peligros en el almacén de combustibles.

Peligro	Sustancia involucrada	Causa	Consecuencias Mayores	Componente
Derrame de combustible	Diesel y gasolina	Derrame de hidrocarburo debido a: -Falla en la válvula de seguridad. -Perforación del recipiente. -Sobrellenado en la recarga.	Atmósfera inflamable	-Válvula de seguridad. -Recipiente.
Incendio de charco	Diesel y gasolina	Ignición del derrame de combustible por generación de energía estática.	Daños por radiación	Falla del sistema de tierra físico.
Fuga de gas	Gas licuado de petróleo	Fuga debido a falla en la válvula de seguridad.	Desplazamiento de oxígeno y atmósfera explosiva	Válvula de seguridad.
Nubes explosivas	Gas licuado de petróleo	-Acumulación del gas en zona cercana a la fuente y presencia de punto de ignición.	Daños por sobrepresión y radiación.	-Válvula de seguridad. -Falla de componente electrónico, representando el punto de ignición.
Explosión de vapor que se expande por líquido en ebullición (BLEVE).	Gas licuado de petróleo	Explosión de líquido en ebullición debido a: -Falla en la válvula de seguridad. -Sobrellenado. -Corrosión del recipiente. -Presión excesiva. -Calentamiento externo.	Daños por sobrepresión y radiación.	-Válvula de seguridad. -Condiciones mecánicas del recipiente.

Por otro lado las zonas que se pueden distinguir como vulnerables al exterior de la institución (figura 7.2), son el río Laja, el libramiento sur de Celaya (carretera), áreas de

esparcimiento del municipio, las oficinas del Instituto Municipal de Investigación, Planeación y Estadística (IMIPE) y una estación C4, la cual es un centro de operaciones de seguridad de Celaya donde se concentra el sistema de atención a la ciudadanía.



Figura 7.2. Mapa externo de identificación de áreas vulnerables.

7.3 Análisis de datos meteorológicos

La meteorología es un aspecto importante que se debe considerar al momento de realizar estudios de riesgo, debido a que ésta determina el transporte y dispersión de los materiales emitidos a la atmósfera (Dinámica Heurística , 2012).

La temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, son variables consideradas por los modelos utilizados para simular escenarios de emisión de materiales peligrosos.

La **velocidad del viento** es importante para la dispersión de las sustancias emitidas a la atmósfera, así como para la transferencia de masa en caso de que exista evaporación. Cuando se presentan velocidades del viento altas, la tasa de mezclado con el aire tiende a incrementar, de manera que las concentraciones máximas pueden disminuir. En el caso de derrames de líquidos, una alta velocidad del viento implica el incremento de la tasa de evaporación y la intensidad de formación de la pluma

(Dinámica Heurística , 2012). La **dirección del viento** es utilizada para aproximar la dirección de transporte de la pluma formada.

La velocidad del viento normalmente es medida a una altura estándar de 10 m. Para ajustar la velocidad del viento a la altura de la fuente de emisión, el software SCRI utiliza la ecuación de la ley de la potencia, la cual se define en la ecuación 7.1.

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^p \quad (7.1)$$

Donde:

u: Velocidad del viento a la altura z (m/s)

u_1 : Velocidad del viento medida a la altura z_1 (m/s)

z: Altura de la fuente (m)

p: Exponente relacionado con la estabilidad y rugosidad de superficie (adimensional)

Por otro lado, la **temperatura** puede determinar si el material emitido se convierte en dos fases, entra en ebullición o se evapora. Simultáneamente, la **humedad relativa** puede determinar la altura de la pluma sobre el suelo.

Para determinar la frecuencia de ocurrencia de velocidad y dirección del viento se utilizó el programa Wind Rose Plot de Lakes Environmental. Y, para analizar los datos de temperatura y humedad relativa, se realizaron series de tiempo, en MATLAB, con promedio horario de cada parámetro, tomando las horas del día de 1 a 24.

La caracterización climática se efectuó para las cuatro estaciones del año en el hemisferio norte (primavera, verano, otoño e invierno), dado que en cada estación se presenta una notable variación de temperatura y humedad relativa.

Para este estudio se analizaron los datos meteorológicos del año 2012 de la Estación Fundación, ubicada en Celaya, Guanajuato, con coordenadas 20°31'49.8" N y 100°48'16.8" W, a una altitud de 1,713 msnm. Dichos datos fueron proporcionados por el Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos del Instituto Nacional de Investigadores Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Primavera

En el hemisferio norte, la primavera inicia el 21 de marzo y termina el 21 de junio, la duración de esta estación es aproximadamente de 92 días aproximadamente. En la figura 7.3 se tiene un promedio horario de temperaturas para esta estación.

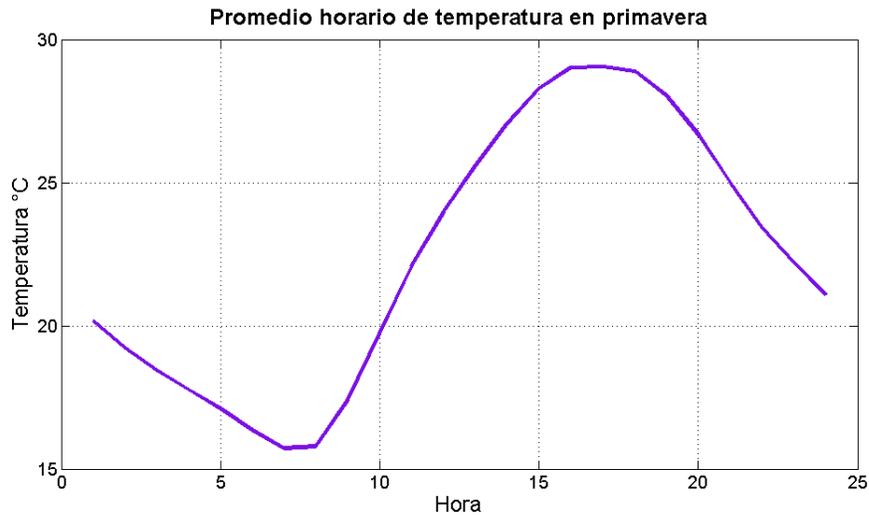


Figura 7.3. Temperatura máxima y mínima en primavera.

En la figura anterior se puede observar que la temperatura mínima en primavera es de 16 °C la cual se presenta alrededor de las 6 horas, y la máxima es de 29 °C a las 16 horas. A continuación se tiene la gráfica de humedad relativa en primavera (figura 7.4).

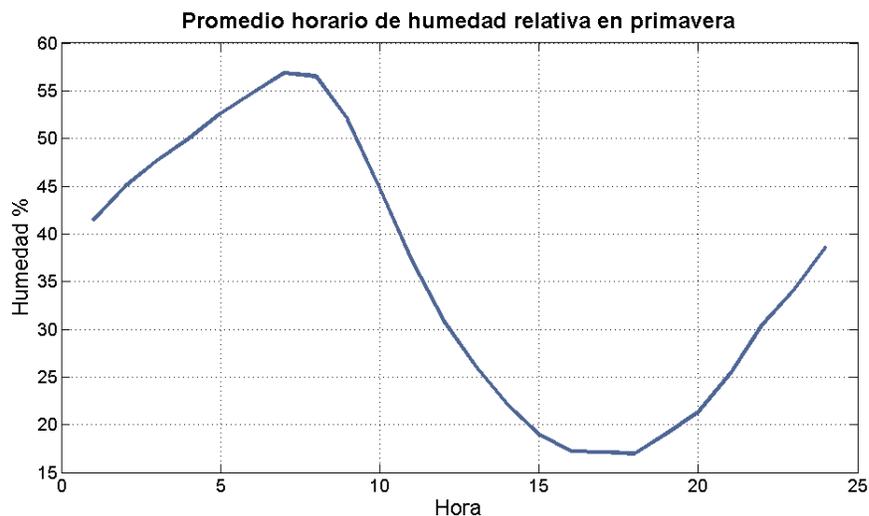


Figura 7.4. Humedad relativa mínima y máxima en primavera.

De acuerdo a la gráfica anterior, se tiene que la humedad relativa mínima es del 17 % y la máxima del 57%, en primavera. Las velocidades y dirección del viento predominante en dicha estación, se tienen representadas en la figura 7.5.

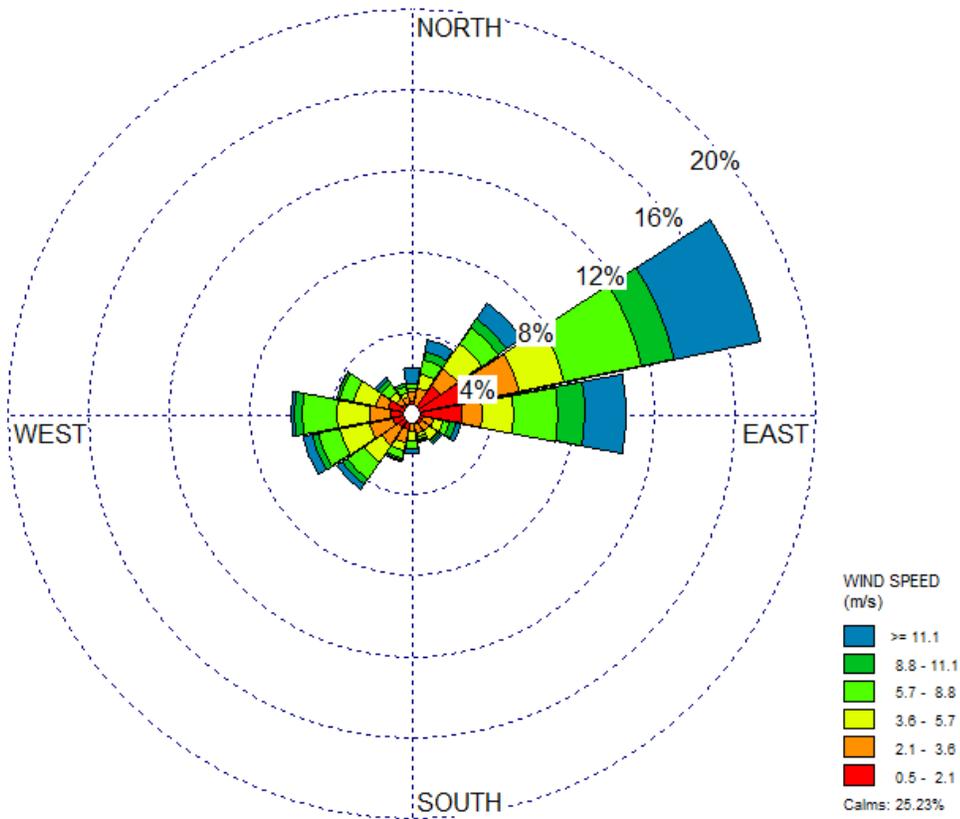


Figura 7.5. Velocidad y dirección del viento en primavera.

En la figura de velocidad y dirección del viento en primavera, se puede observar que la dirección del viento predominante proviene del Noreste con un 17.5% de frecuencia, mientras que la velocidad del viento que predomina son las calmas (velocidad del viento menores a 0.5 m/s) con un 25.23% de frecuencia sin dirección definida. Sin embargo las velocidades que provienen del Noreste, con mayor frecuencia, son mayores a 11.1 m/s.

Verano

El verano se presenta entre el 22 de junio y 23 de septiembre, con una duración aproximada de 93 días. El promedio horario de temperaturas en esta estación se tiene en la figura 7.6.

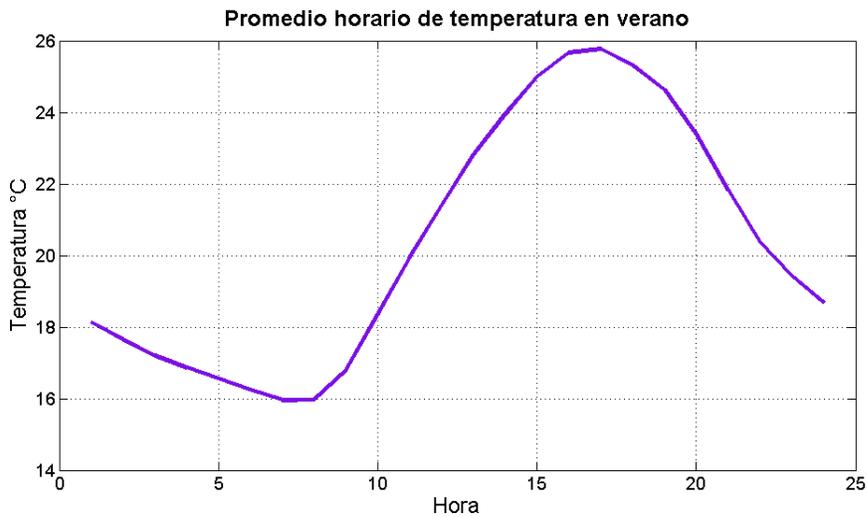


Figura 7.6. Temperatura máxima y mínima en verano.

En esta estación del año, se tienen 16°C como temperatura mínima, mientras que la máxima es de 25.8 °C. Por otro lado, los máximos y mínimos de humedad relativa presentes en esta estación se encuentran en la figura 7.7.

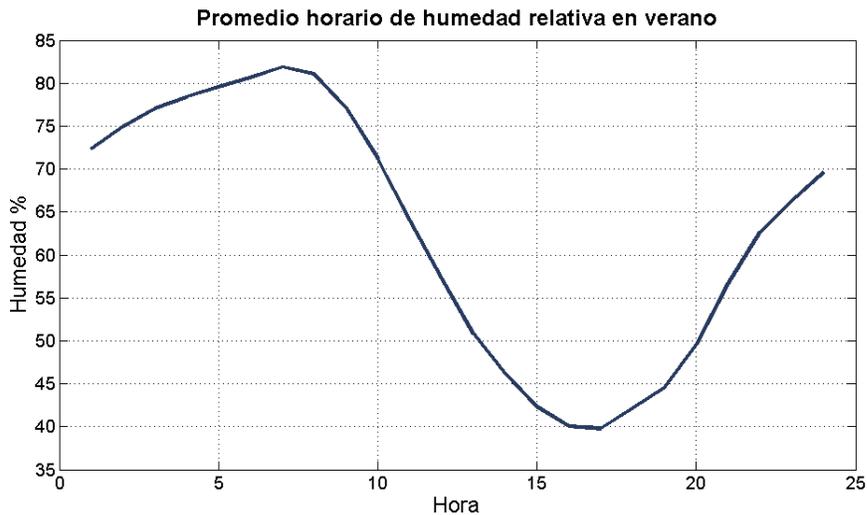


Figura 7.7. Humedad relativa mínima y máxima en verano.

Observando la figura de humedad relativa en verano, se tiene que la humedad relativa máxima es de 82% y la mínima de 40%. A continuación se presentan las velocidades y dirección del viento predominante en verano (figura 7.8).

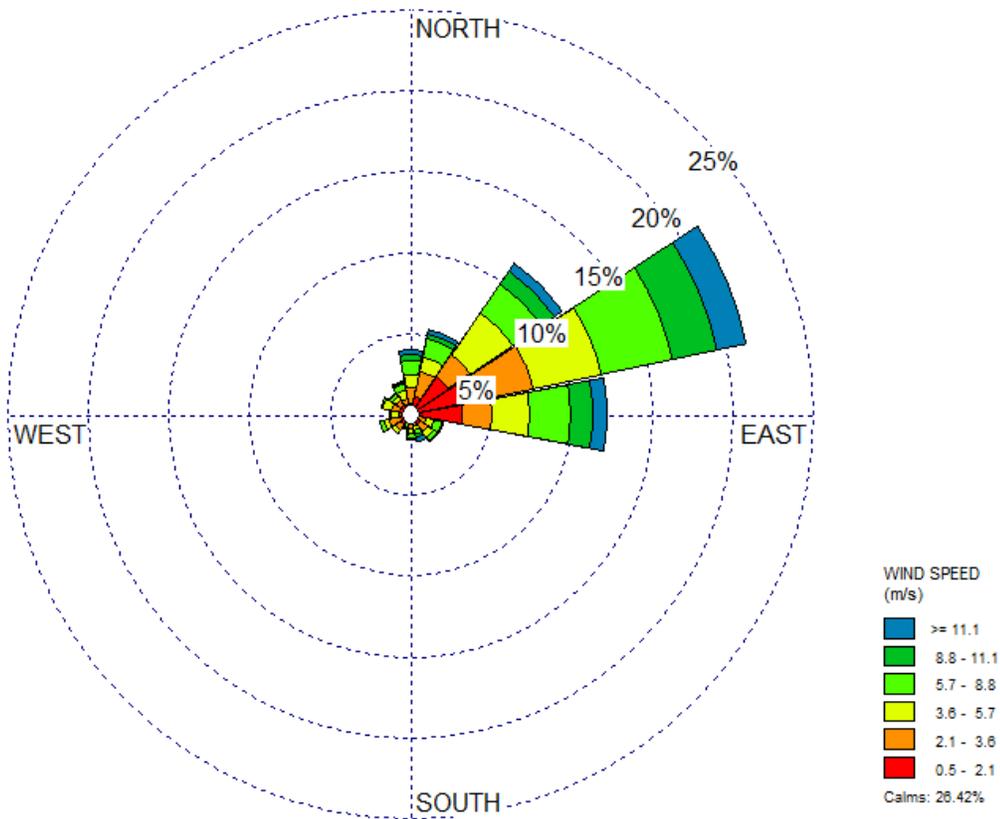


Figura 7.8. Velocidad y dirección del viento en verano.

Analizando la gráfica anterior, la dirección del viento predominante proviene del Noreste con un 21.18% de frecuencia, donde las velocidades del viento con mayor ocurrencia son las que se encuentran entre 5.7 y 8.8 m/s. Cabe mencionar que las velocidades menores a 0.5 m/s tienen un alto porcentaje de ocurrencia con respecto a los demás rangos de velocidades.

Otoño

El Otoño se presenta entre el 24 de Septiembre y 21 de Diciembre. La duración de esta estación es de 89 días aproximadamente. El promedio horario de temperatura se presenta en la figura 7.9.

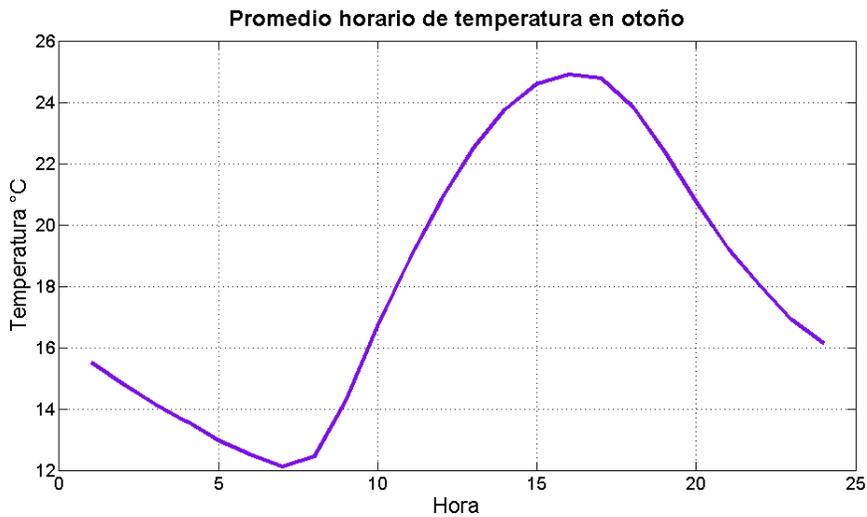


Figura 7.9. Temperatura máxima y mínima en otoño.

En esta estación, particularmente se tiene una temperatura mínima de 12.1°C y una máxima de 25°C. En la figura 7.10 se tiene una gráfica del promedio horario de humedad relativa en dicha estación.

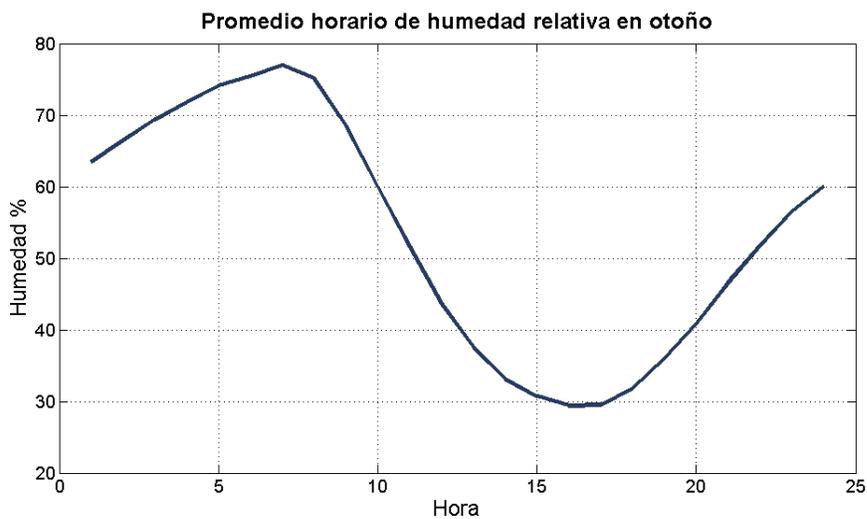


Figura 7.10. Humedad relativa máxima y mínima en otoño.

Para la humedad relativa, en otoño, se tiene un valor mínimo de 29.9% y un máximo de 78%. A continuación se presenta la velocidad y dirección del viento predominante (figura 7.11).

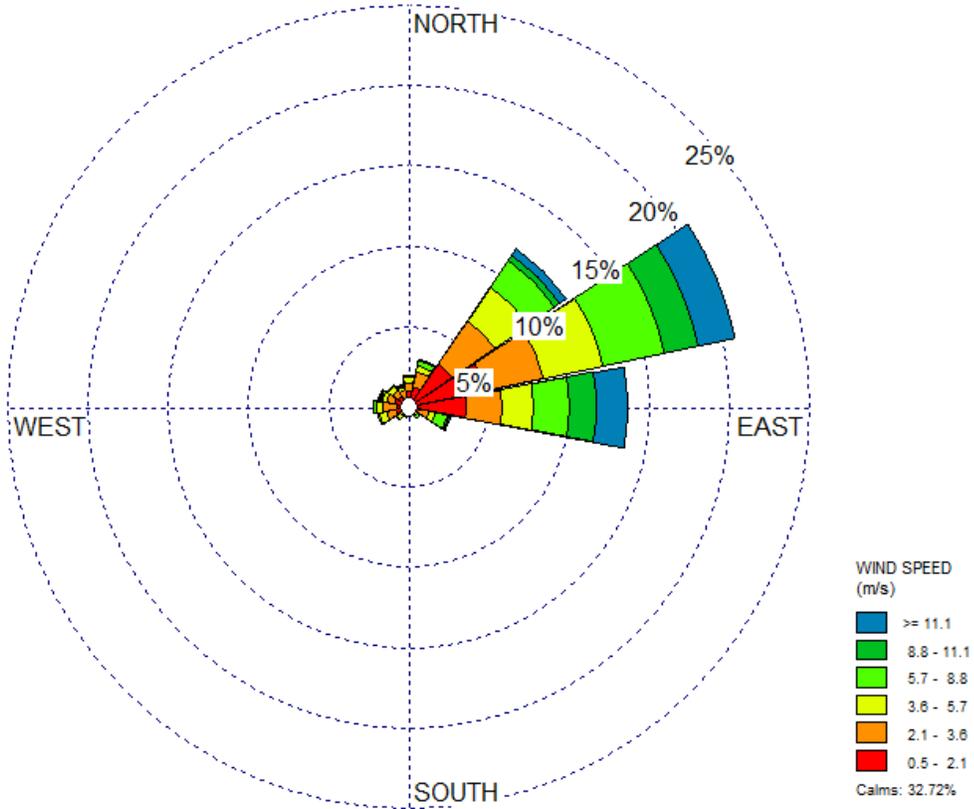


Figura 7.11. Velocidad y dirección del viento en otoño.

En esta estación, la dirección con mayor frecuencia es la que proviene del Noreste con 20.7%, destacando que son las velocidades entre 0.5 y 2.1 m/s las que predominan en esta dirección.

Invierno

El invierno se presenta entre el 22 de diciembre y 20 de marzo, con una duración aproximada de 89 días. El promedio horario de temperatura en invierno se tiene en la figura 7.12

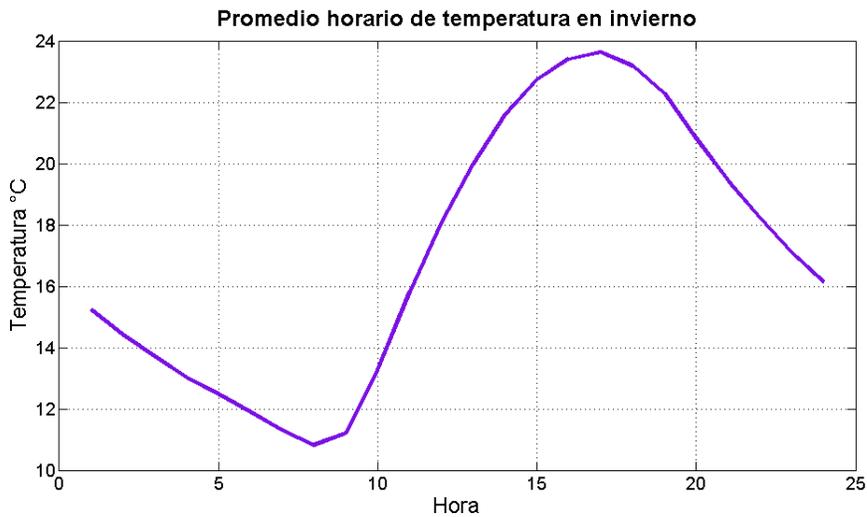


Figura 7.12. Temperatura máxima y mínima en invierno.

Analizando los resultados de temperatura en este periodo, se observa que la temperatura mínima es de 10.9°C y la máxima de 23.8°C. Comparando con las demás estaciones, en ésta se registra una temperatura más baja. Por otro lado, los máximos y mínimos de humedad relativa se encuentran en la figura 7.13.

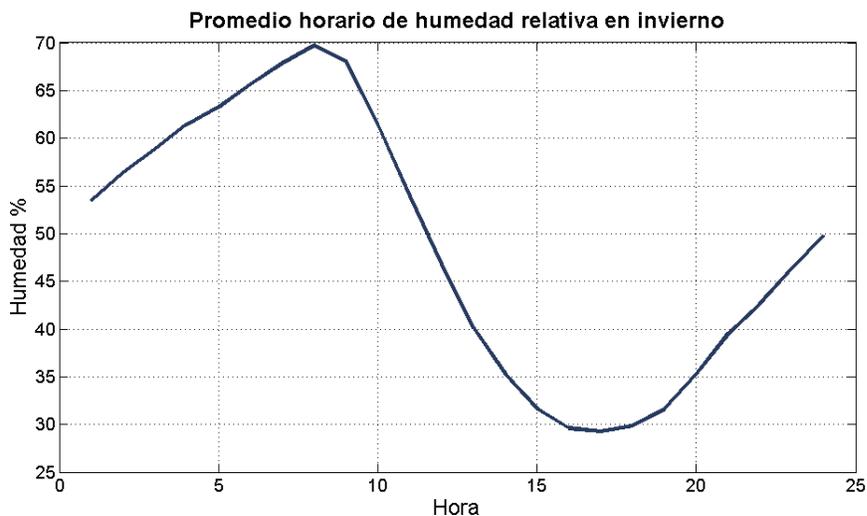


Figura 7.13. Humedad máxima y mínima en invierno.

En este periodo, se tiene una humedad relativa mínima de 29 % la cual ocurre alrededor de las 17 horas, y una máxima de 69% a las 8 horas. A continuación se presenta la velocidad y dirección del viento predominante (figura 7.14).

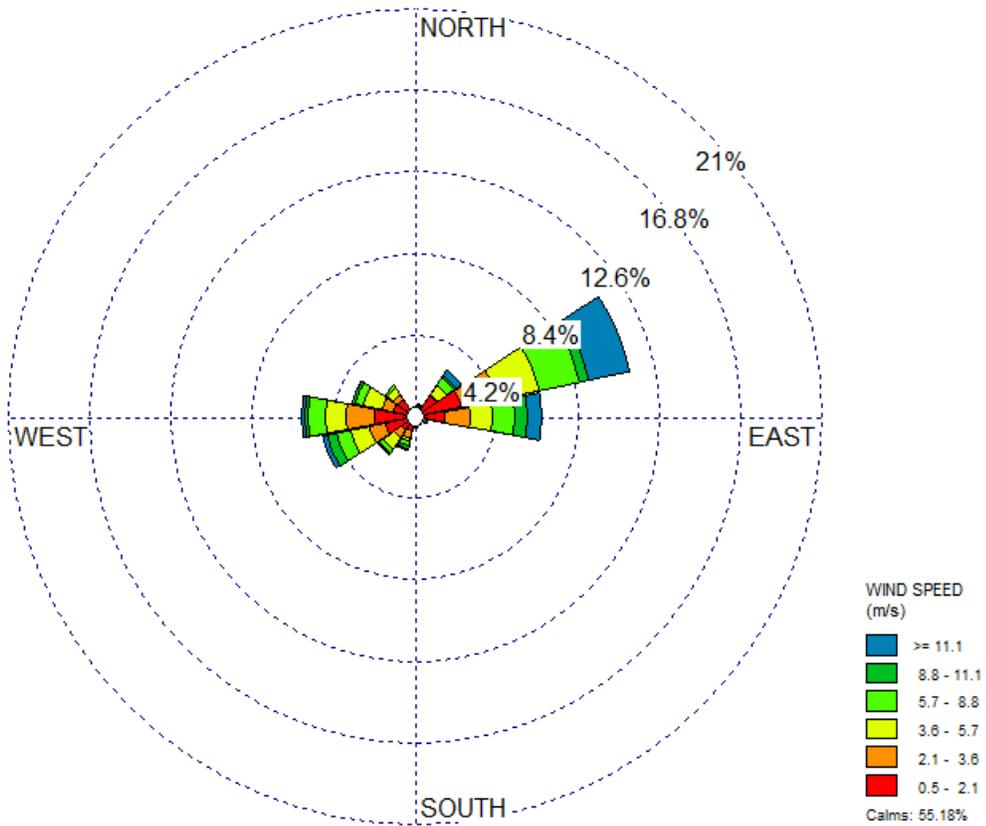


Figura 7.14. Velocidad y dirección del viento en invierno.

En invierno, predominan las calmas con un 55.18% de ocurrencia. Sin embargo, el rango de velocidades que predominan en la dirección Noreste, están entre 0.5 y 2.1 m/s, lo cual indica que en este periodo, las velocidades del viento suelen ser más bajas.

Resumen

Analizando los resultados de todas las estaciones, para las variables de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, la tabla 7.6 muestra un resumen de valores máximos y mínimos para temperatura y humedad, así como velocidad y dirección del viento predominante.

Tabla 7.6. Caracterización climática en cada estación del año en Celaya, Gto.

Variables		Estaciones del año			
		Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Temperatura (°C)	Mín.	16	16	12.1	10.9
	Máy.	29	28.8	25	23.8
Humedad relativa (%)	Mín.	17	40	29.9	49
	Máy.	57	82	78	69
Velocidad del viento (m/s)		> 11.1	5.7-8.8	0.5-2.1	0.5-2.1
Dirección del viento		NE	NE	NE	NE

Los escenarios meteorológicos a simular corresponden a valores de temperatura mínima y humedad relativa máxima, así como, temperatura máxima y humedad relativa mínima, con respectivos valores de velocidad y dirección del viento para todas las estaciones, quedando así un total de 8 escenarios.

Para las simulaciones se tomarán los valores de velocidad del viento del límite inferior, debido a que representa la peor condición para la dispersión de las sustancias. En el caso de velocidades con valor de 0.5 m/s, se tomará como límite 1 m/s, pues el programa de simulación reconoce solo velocidades mayores a dicho valor. Cabe mencionar que de presentarse velocidades menores a 1 m/s, la estimación de concentraciones por fuga de sustancias peligrosas podría resultar en valores de concentración mayor a los calculados.

7.4 Familiarizarse con los programas: SCRI, ALOHA Y EFFECTS

Los programas de análisis de consecuencias se utilizarán para determinar los radios de afectación por fugas, derrames, incendio y explosión de sustancias peligrosas, en diferentes tipos de escenarios posibles (BLEVE, Jet Fire, Bola de fuego, etc.) dependiendo de las propiedades fisicoquímicas de las sustancias en cuestión. Así mismo, éste requiere de cierta información como los datos meteorológicos del sitio, es decir, la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, también es necesario contar con información características de almacenamiento, volumen, etc. Los programas cuentan con una base de datos que contiene las propiedades físicas, químicas y energéticas de la sustancias.

Algunos datos de entrada requieren de un cálculo previo, como es la tasa de emisión o masa del material en cuestión. Además es importante saber qué tipo de escenario se puede presentar con cada sustancia, porque de lo contrario se estarían estimando radios de afectación erróneos.

Los programas de simulación permiten introducir el mapa del sitio, reconociendo las dimensiones del mismo, para imprimir la proyección en el área de resultados de los radios de afectación los cuáles tienen información de la sobrepresión y radiación que se genera en cada uno de ellos, según sea el caso.

7.5 Propuesta de escenarios por fugas de sustancias peligrosas

Para realizar el análisis de consecuencias, es necesario considerar el tipo de escenario que puede desencadenarse dependiendo de la sustancia involucrada, ya que cada material tiene propiedades fisicoquímicas y condiciones de almacenamiento diferentes, siendo estas características importantes en cuanto al desarrollo de un evento que puede traer consigo consecuencias catastróficas.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, los escenarios de explosión e incendio pueden presentarse con materiales peligrosos en entornos donde la falta de controles de ingeniería en los procesos, errores humanos, fallo de componentes, etc., son causas que hacen probable la manifestación de los mismos. Estos escenarios tienen características particulares cuyo grado de impacto depende del material peligroso involucrado y de las condiciones meteorológicas presentes al momento de la contingencia. Sin embargo, si se tiene un buen control en las condiciones de manejo y almacenamiento, se puede disminuir su frecuencia.

Las sustancias de interés, en este estudio, son: gas L.P., gasolina y diesel. Dichas sustancias son capaces de crear atmósferas peligrosas, por lo que en este apartado se estudiarán los sucesos que pueden desencadenarse por las características de almacenamiento de estas sustancias en el sitio particular de estudio, empleando la técnica del árbol de sucesos para facilitar el entendimiento de los factores que condicionan el desarrollo de los diferentes escenarios.

La gasolina y el diesel son líquidos inflamables, que al fugarse del recipiente que los contiene, pueden transportarse en el suelo y formar un charco, que en caso de estar contenido, tendrá las dimensiones del dique de contención. Estas sustancias pueden evaporarse dependiendo de las condiciones de temperatura ambiental y formar nubes inflamables y al presentarse un aporte de energía puede ocasionarse un denominado “incendio de charco”. En el sitio de estudio, los tanques que contienen gasolina y diesel se encuentran en un dique de concreto, cuya capacidad máxima es de 190.4 m³ la cual es suficiente para contener un volumen de 36.21 m³ que conforman una mezcla de estas sustancias.

El gas licuado de petróleo es un gas inflamable a temperatura ambiente que se almacena como líquido por efecto de la presión. El tipo de tanques que contienen esta sustancia, son diseñados bajo normas como la NOM-009-SESH-2011, la cual tiene especificaciones y métodos de prueba para los recipientes que contienen Gas L. P.

Aunque los tanques son diseñados bajo estándares de calidad que les confieren seguridad, si se les somete a fuego lo suficientemente fuerte y duradero, o si se debilita por corrosión o un impacto, el tipo de accidente que puede ocurrir en estos casos es una BLEVE (CIQUIME, 2013).

Cuando un tanque que contiene gas licuado de petróleo está expuesto a calentamiento externo, la temperatura en las paredes del mismo incrementa causando que la resistencia del tanque decaiga, por lo que las paredes se vuelven más delgadas en el área afectada. Esto puede provocar que el tanque falle catastróficamente generando la BLEVE (CIQUIME, 2013).

Por el contrario, si el tanque solo presenta una fuga por encima del nivel del líquido, sin que haya un punto de ignición, entonces el líquido puede entrar en ebullición gradualmente y salir del tanque en forma de vapor. La fuga también puede presentarse si el tanque es pinchado en el nivel del líquido, pero en este caso el líquido entrará en contacto con el suelo y por el aporte de calor en el medio ambiente puede hervir rápidamente fuera del tanque. La turbulencia de cada evento dependerá del tamaño del agujero por el que se escapa la sustancia, entre mayor sea la velocidad de escape será más turbulenta (CIQUIME, 2013).

Una vez que se identifica lo que puede ocurrir con las sustancias involucradas, se pueden definir los eventos asociados a sucesos iniciadores con las mismas, basándose en factores condicionantes que determinan las consecuencias de cada cadena de eventos. Para facilitar el desarrollo de la predicción de consecuencias se proponen los escenarios que pueden presentarse empleando el árbol de sucesos.

En el caso estudio se pueden tener dos sucesos iniciadores que están basados en el escape de la sustancia desde su contenedor. En las figura 7.15 y 7.16 se muestran los árboles de sucesos, en el primero se toma como suceso iniciador la fuga de Gas L.P, y en el segundo se considera la fuga de hidrocarburo líquido.

A cada suceso iniciador le corresponde una frecuencia cuyo valor depende del tipo de sistema de almacenamiento (tabla 7.7).

Tabla 7.7. Frecuencias de los sucesos iniciadores para el árbol de sucesos.

Sistema	Frecuencia* (año ⁻¹)
Tanque presurizado (estacionario)	5 x 10 ⁻⁷
Tanques atmosféricos	1 x 10 ⁻⁸

*Los valores de frecuencia fueron dados por Casal (2008).

Por otro lado, los factores condicionantes tienen una probabilidad asociada la cual depende del tipo y cantidad de sustancia liberada, así como de factores externos aledaños a la instalación de almacenamiento (ver tabla 7.8). La probabilidad complemento se expresa para cada fracaso como la diferencia de 1-P_n (n= 1, 2, 3, 4, 5, 6).

Tabla 7.8. Valores de probabilidad para los factores condicionantes.

Probabilidad	Valor*	Observaciones
P ₁	0.5	La masa de la sustancia liberada se encuentra entre 1,000 kg y 10,000 kg.
P ₂	0.7	Probabilidad de BLEVE debido a la ignición inmediata de la liberación instantánea.
P ₃	0.7	Probabilidad de ignición retardada en una zona con posibles fuentes de ignición.
P ₄	0	La cantidad de material dispersa en el aire no es mayor a 500 kg.
P ₅	0.065	Probabilidad de ignición inmediata para sustancias altamente inflamables.

* Los valores de probabilidad fueron dados por Vílchez et al. (2011).

SUCESO INICIADOR $f(\text{año}^{-1})$	FACTORES CONDICIONANTES				CONSECUENCIAS $f(\text{año}^{-1})$	
	Ignición inmediata	Bola de fuego (BLEVE)	Ignición retardada	Aceleración del frente de llama		
Fuga de Gas L.P. en forma de aerosol/líquido 5.00E-07	Si $P_1 = 0.5$	Si $P_2 = 0.7$			Bola de fuego (BLEVE) 1.75E-07	
		No $\bar{P}_2 = 0.3$	Si $P_4 = 0$		Nube explosiva 0.00	
				No $\bar{P}_4 = 1$		Dardo de fuego 7.50E-08
				Si $P_4 = 0$		Nube explosiva 0.00
	No $\bar{P}_1 = 0.5$			Si $P_3 = 0.7$		Llamarada 1.75E-07
				No $\bar{P}_3 = 0.3$		Sin consecuencias 7.50E-08
				Si $P_3 = 0.7$		
				No $\bar{P}_3 = 0.3$		

Figura 7.15. Árbol de sucesos con suceso iniciador de una fuga instantánea líquido/aerosol de Gas L.P.

SUCESO INICIADOR f (año ⁻¹)	FACTORES CONDICIONANTES			CONSECUENCIAS f (año ⁻¹)
	Ignición inmediata	Ignición retardada	Aceleración del frente de llama	
Fuga de Gasolina y Diesel 1.00E-08	Si $P_5 = 0.065$			Incendio de charco 6.50E-10
			Si $P_4 = 0$	Explosión + Incendio de charco 0.00E+00
	No $\bar{P}_5 = 0.935$	Si $P_3 = 0.7$	No $\bar{P}_4 = 1$	Llamarada + Incendio de charco 6.55E-09
			No $\bar{P}_3 = 0.3$	Sin consecuencias 2.81E-09

Figura 7.16. Árbol de sucesos con suceso iniciador de una fuga de Gasolina y Diesel.

Del árbol de sucesos donde el suceso iniciador parte de una fuga del tanque que contiene Gas L.P., se tiene que las consecuencias son: **Bola de fuego (como consecuencia de una explosión tipo BLEVE), nube explosiva, dardo de fuego y llamarada.**

Por otra parte, para el suceso iniciador de la fuga de gasolina y diesel, se tiene que los escenarios son: **Incendio de charco, explosión más incendio de charco y llamarada.** Las frecuencias de cada escenario se resumen en la tabla 7.9.

Tabla 7.9. Estimación de frecuencias de los escenarios accidentales.

Escenario	Estimación de frecuencia (f)	Frecuencia
Bola de fuego	$f = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 0.7$	$f_{BLEVE} = 1.75 \cdot 10^{-7} \text{año}^{-1}$
Nube explosiva	$f = (5 \cdot 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 0.3 \cdot 0) + (5 \cdot 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 0.7 \cdot 0)$	$f_{UVCE} = 0$
Dardo de fuego	$f = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 0.3 \cdot 1$	$f_{Jet Fire} = 7.5 \cdot 10^{-8} \text{año}^{-1}$
Llamarada por fuga Gas L.P.	$f = 5 \cdot 10^{-7} \cdot 0.5 \cdot 0.7 \cdot 0.6$	$f_{Flash Fire} = 1.05 \cdot 10^{-7} \text{año}^{-1}$
Incendio de charco	$f = (1 \cdot 10^{-8} \cdot 0.065) + (1 \cdot 10^{-8} \cdot 0.935 \cdot 0.7 \cdot 1)$	$f_{Pool Fire} = 7.20 \cdot 10^{-9} \text{año}^{-1}$
Explosión + incendio de charco	$f = 1 \cdot 10^{-8} \cdot 0.935 \cdot 0.7 \cdot 0$	$f_{Explosion + Pool fire} = 0$
Llamarada por fuga de Gasolina y Diesel	$f = 1 \cdot 10^{-8} \cdot 0.935 \cdot 0.7 \cdot 1$	$f_{Flash Fire} = 6.55 \cdot 10^{-9} \text{año}^{-1}$

Los escenarios accidentales a simular serán la bola de fuego, llamarada por fuga de Gas L.P., nube explosiva, incendio de charco y llamarada por fuga de gasolina y diesel. Por otro lado, los radios de afectación por dardo de fuego no serán simulados, debido a que la bola de fuego es un escenario con mayores riesgos por radiación ocasionada por el almacenamiento de gases licuados bajo presión.

La explosión más un incendio de charco, el cual es un escenario que tiene una frecuencia de cero, no será simulado debido a que las condiciones del medio no inducen a la formación de una nube de vapores de gasolina suficientes para generar una explosión. Sin embargo, el escenario de nube explosiva, aunque tiene una frecuencia de cero, existe cierta cantidad de masa explosiva de Gas L.P. en el aire, suficiente para generar una explosión, por lo que se determinarán las consecuencias del mismo.

Para la simulación del incendio de charco y llamarada por fuga de gasolina y diesel se considera que la sustancia liberada sería gasolina debido a que es más volátil e inflamable que el diesel.

7.6 Análisis de consecuencias con SCRI

El análisis de consecuencias es una evaluación cuantitativa de la evolución de un fenómeno de tipo peligroso en el que intervienen sustancias peligrosas. El objetivo principal es estimar la magnitud de los posibles efectos sobre las personas, el medio ambiente e instalaciones.

Este tipo de evaluación se basa en supuestos en el que bajo condiciones críticas se pueden desencadenar eventos peligrosos, esto con el fin de planificar las zonas de amortiguamiento dentro de un sitio donde se realicen actividades altamente riesgosas por el tipo de sustancias que se manejan, en caso de presentarse un escenario catastrófico.

Los escenarios que se presentarán a continuación son: Lllamarada por fuga de Gas L.P., nube explosiva, BLEVE, Lllamarada con Gasolina e incendio de charco. Se determinaron que estos serían los escenarios a simular por los efectos que pueden causar el tipo de sustancias en cuestión. Dichos escenarios serán simulados en el programa SCRI.

7.6.1 Lllamarada por fuga de Gas L.P.

Como ya se mencionó en el apartado anterior, la fuga de gas licuado de petróleo puede presentarse en dos formas: fuga desde el espacio de vapor y por debajo del nivel del líquido. El cálculo de la tasa de emisión de estos posibles escenarios es diferente, pues la sustancia se encuentra en fases distintas, aunque al entrar en contacto con la temperatura y presión del medio ambiente la fase líquida se vuelve solo vapor. La fuga de vapor se da de manera gradual, mientras que la fuga desde el nivel del líquido hace que el proceso sea más rápido por la turbulencia que implica el cambio repentino de fase (de líquido a vapor).

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones en ambas fases para los 8 escenarios meteorológicos antes mencionados, tanto en condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima (las cuales se presentan en horarios donde la radiación es prácticamente nula), como para temperatura máxima y humedad relativa mínima (hay presencia de radiación solar). La presencia o ausencia de radiación solar implica una estabilidad atmosférica diferente (considerando la velocidad del viento). Una atmósfera muy estable puede implicar la escasa dispersión de la sustancia peligrosa.

Llamarada de Gas L.P. por fuga desde el espacio de vapor

Para el cálculo de la tasa de emisión en esta fase se calculó primero la presión en el punto de salida del gas, ya que debido a las altas presiones que se utilizan en el almacenamiento del Gas L.P., la velocidad de escape puede alcanzar la velocidad del sonido, aunque nunca será mayor a ésta. Si la presión de escape es mayor que la presión ambiental, entonces se estará considerando condiciones de flujo crítico. La presión en el punto de salida del gas se calcula con la ecuación 7.2 (Dinámica Heurística, 2013):

$$\frac{P^*}{P_s} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (7.2)$$

Donde:

P^* : Presión en el punto de salida (Pa)

γ : Razón de calores específicos, a presión y volumen constante (adimensional)

P_s : Presión de almacenamiento (Pa)

Utilizando un valor de 1.72 MPa (17.2 bar) de presión de diseño de tanques de almacenamiento de Gas L.P., especificado en la NOM-009-SESH-2011 y una relación de calores específicos de 1.12 tomada de la base de datos del programa SCRI-Modelos, la presión en el punto de salida resultó en un valor de 1.6 MPa, siendo mayor que la presión ambiental, por lo tanto se considerará una fuga de gas con flujo crítico.

La tasa de emisión del gas con flujo crítico, se calculó con la ecuación 7.3:

$$E = CA_o \left[P_s \rho_s \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{(\gamma + 1)}{(\gamma - 1)}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.3)$$

Donde:

E: Tasa de emisión (kg/s)

A_o : Área del agujero (m^2)

ρ_s : Densidad de almacenamiento de la sustancia (kg/m^3)

C: Coeficiente de descarga, 0.75 (adimensional)

Para el cálculo de la emisión se utilizó la base de datos del programa para obtener los valores de densidad de almacenamiento y relación de calores específicos para el Gas L.P., considerando el agujero de una válvula de ½" (12.7 mm) de diámetro y que el gas escapa a su temperatura de ebullición (231K). La tasa de emisión resultó en un valor de 0.83 kg/s, la cual se utilizó como dato de entrada para la simulación (tabla 7.10). Se consideran las propiedades del propano para las simulaciones, por ser un componente de Gas L.P. que se encuentra en mayor cantidad.

Tabla 7.10. Datos para la simulación de la llamarada por fuga de Gas L.P desde el espacio de vapor.

Datos de entrada al programa	Valor
Presión de almacenamiento (bar)	17.2
Temperatura en el punto de liberación (K)	231
Diámetro del agujero (mm)	12.7
Duración de la fuga* (s)	600
Fracción en masa de líquido inicial (%)	0
Tasa de emisión en forma de vapor (kg/s)	0.83
Límite inferior de explosividad para el Gas L.P. (ppm)	18,000
Rugosidad del terreno (rural plano) (m)	0.1
Altura de la fuente** (m)	2.1

* Tiempo de liberación considerando un escenario común en los eventos de pérdida de contención de un tanque presurizado (BEVI, 2009).

** La altura de la válvula sobre el nivel del piso es de 2.1 m.

Con los datos meteorológicos que se introducen al programa, éste calcula la clase de estabilidad atmosférica. Los escenarios meteorológicos que corresponden a condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima, utilizados en la simulación, se encuentran plasmados en la tabla 7.11.

Tabla 7.11. Escenarios meteorológicos en condiciones de T_{\min} y $H_{R\max}$.

Parámetros	Escenarios meteorológicos en condiciones de T_{\min} y $H_{R\max}$			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Estabilidad atmosférica de Pasquill	Neutra	Neutra	Muy estable	Muy estable
Velocidad del viento (m/s)	11.1	5.7	1	1
Temperatura (°C)	16	16	12.1	10.9
Humedad relativa (%)	57	82	78	69
Dirección del viento	NE	NE	NE	NE

Los resultados de concentración para los diferentes escenarios meteorológicos se muestran en la siguiente figura.

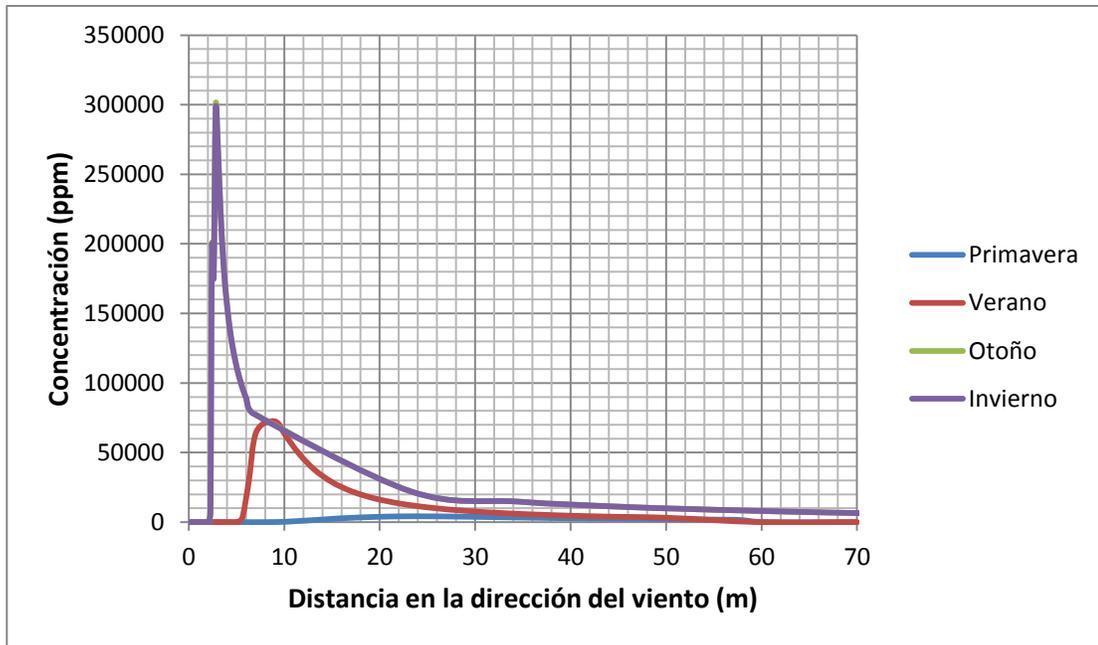


Figura 7.17. Concentración en la dirección del viento en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ para cada escenario meteorológico, por fuga desde el espacio de vapor.

Se puede observar en la figura 7.17 que en las estaciones de otoño e invierno se presentan mayores concentraciones, con valores de 300,000 ppm, respectivamente, a cerca de 2 m de la fuente. Las altas concentraciones en estas estaciones se atribuyen a la baja dispersión de la sustancia en el aire en una atmósfera muy estable con velocidades del viento bajas.

Para las figuras de isoconcentración se presenta el límite inferior de inflamabilidad del Gas L.P. el cual es de un valor de 18,000 ppm, representando así el área inflamable por llamarada.

Para el escenario de primavera, las concentraciones encontradas estuvieron por debajo del límite inferior de inflamabilidad de la sustancia, por lo tanto no se encuentra representado en isoconcentración. A continuación se exponen las imágenes con respectivos niveles de concentración para las estaciones de verano, otoño e invierno, en las figuras 7.18, 7.19 y 7.20, respectivamente.

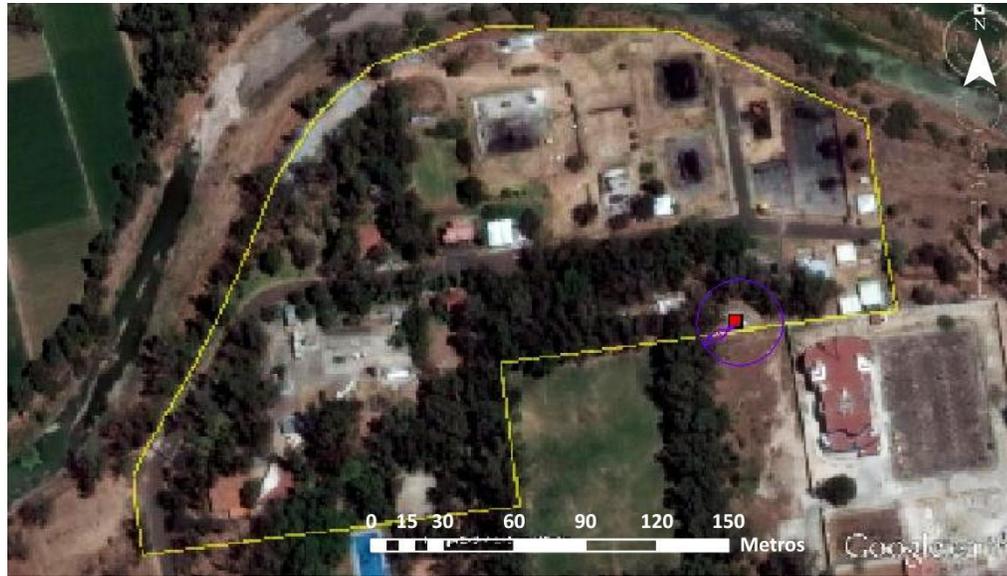


Figura 7.18. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en verano, por fuga desde el espacio de vapor.



Figura 7.19. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en otoño, por fuga desde el espacio de vapor.



Figura 7.20. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en invierno, por fuga desde el espacio de vapor.

Las distancias máximas de afectación por llamarada de Gas L.P., para los diferentes escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$, se encuentran representados en la tabla 7.12.

Tabla 7.12. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gas L.P. en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$, por fuga desde el espacio de vapor.

Concentración (ppm)	Distancia máxima desde la fuente (m)			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Límite inferior de inflamabilidad del Gas L.P. = 18,000	NA	19	29	29

En la tabla anterior se puede observar que las distancias máximas de afectación son mayores en las estaciones de otoño e invierno.

Ahora, para la simulación de los escenarios meteorológicos que corresponden a condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima, considera como datos meteorológicos de entrada los que se encuentran en la tabla 7.13.

Tabla 7.13. Escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$

Parámetros	Escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Estabilidad atmosférica de Pasquill	Neutra	Ligeramente inestable	Muy inestable	Muy inestable
Velocidad del viento (m/s)	11.1	5.7	1	1
Temperatura (°C)	29	25.8	25	23.8
Humedad relativa (%)	17	40	29.9	49
Dirección del viento	NE	NE	NE	NE

Los resultados de concentración para las diferentes estaciones en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$ se muestran en la figura 7.21.

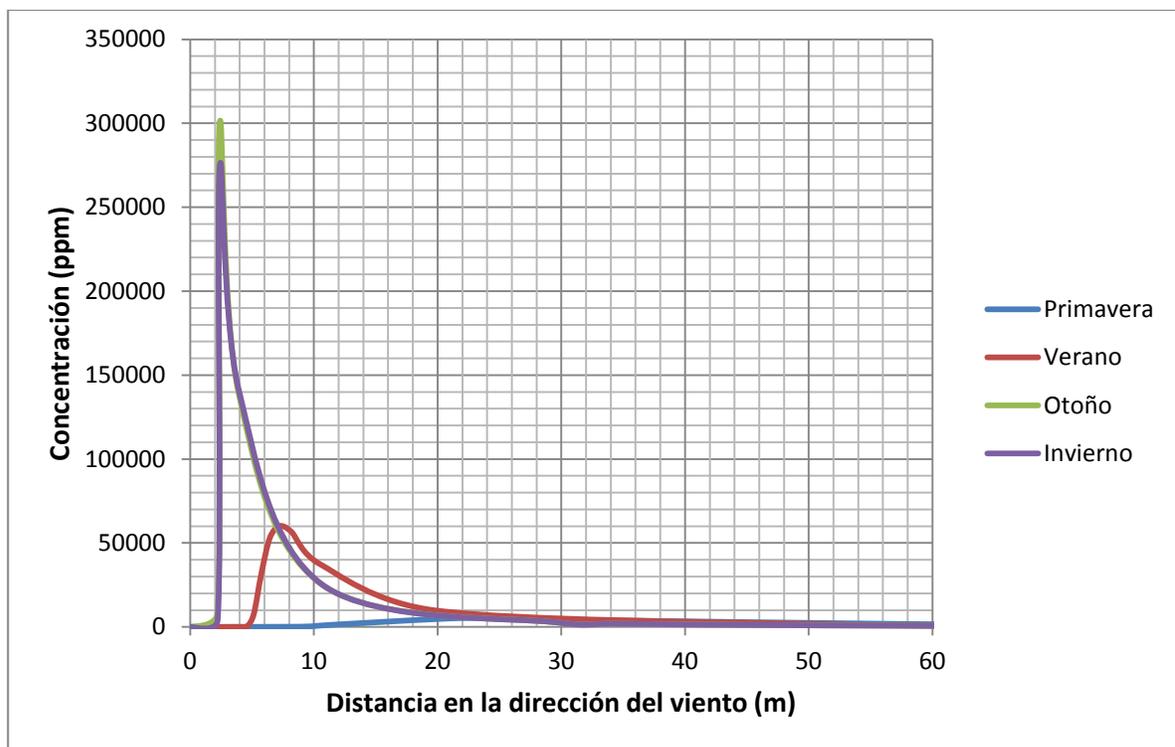


Figura 7.21. Concentración en la dirección del viento en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$ para cada escenario meteorológico, por fuga desde el espacio de vapor.

En la figura anterior se observa que en las estaciones de otoño e invierno se presentan mayores concentraciones con respecto a primavera y verano, con valores máximos de 254,000 ppm y 300,000 ppm, respectivamente, a 2 m de la fuente. Aunque en este caso las estabildades atmosféricas en otoño e invierno corresponden a una atmosfera

muy inestable, las velocidades del viento son bajas con respecto a primavera y verano, por lo que la dispersión del gas es mínima ocasionando concentraciones mayores.

A continuación se presentan las imágenes con isoconcentraciones para los diferentes escenarios meteorológicos en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima (figura 7.22, 7.23 y 7.24). Para el escenario en primavera las concentraciones se encuentran por debajo de 18,000 ppm, por lo que no existe área inflamable en esas condiciones.



Figura 7.22. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en verano, por fuga desde el espacio de vapor.



Figura 7.23. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en otoño, por fuga desde el espacio de vapor.



Figura 7.24. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en Invierno, por fuga desde el espacio de vapor.

Las distancias máximas de afectación por llamarada de Gas L.P. desde el espacio de vapor, para los diferentes escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$, se encuentran representados en la tabla 7.14.

Tabla 7.14. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gas L.P. en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{R\text{mín}}$, por fuga desde el espacio de vapor.

Concentración (ppm)	Distancia máxima desde la fuente (m)			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Límite inferior de inflamabilidad del Gas L.P.= 18,000	NA	15	13	13

En la tabla anterior se puede observar que las distancias máximas de concentración son mayores en verano pues se presenta una atmósfera ligeramente inestable con respecto a la atmósfera muy inestable en otoño e invierno, lo cual ocasiona que la nube se mueva más lento afectando menor área.

Llamarada de Gas L.P. por fuga desde el espacio del líquido

La emisión de líquido que se encuentra bajo presión se vaporizará al entrar en condiciones ambientales, pues la presión del líquido bajará hasta la presión ambiental de manera repentina. La tasa de emisión en esta fase se calculó con las ecuaciones 7.4 y 7.5, para líquido presurizado, considerando es escape directo del tanque (la longitud de la tubería es igual a 0).

$$E_L = A_0 \left(\frac{\lambda M P_s}{R T_s^2} \right) \left(\frac{T_s}{N C_{pl}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.4)$$

$$N = \frac{R (\lambda M P_s)^2}{2 (P_s - P_a) \rho_l C^2 (R T_s)^3 C_{pl}} + \frac{L_p}{L_e} \quad (7.5)$$

Donde:

E_L : Emisión de líquido presurizado (kg/s).

A_0 : Área del agujero (m^2).

M : Peso molecular (kg/kmol).

λ : Calor de vaporización a T_b (J/kg).

R : Constante de gas ideal (8,314 J/kmol $^\circ\text{K}$).

T_s : Temperatura de almacenamiento ($^\circ\text{K}$).

P_s : Presión de almacenamiento (Pa).

C_{pi} : Capacidad calorífica del líquido a T_s (J/kg $^{\circ}$ K).

P_a : Presión ambiental (Pa).

ρ_l : Densidad del líquido a T_b (kg/m 3).

T_b : Temperatura de ebullición normal ($^{\circ}$ K).

C: Coeficiente de descarga, 0.6 (adimensional).

L_p : Longitud de tubería (m)

L_e : Longitud de la tubería requerida para flujo de equilibrio (m), asumir 0.1 m.

Se utilizó la base de datos del SCRI-Modelos para las propiedades físicas, químicas y energéticas del gas licuado de petróleo para el cálculo de la tasa de emisión. Considerando una ruptura con diámetro de 1/2", la tasa de emisión resultó en 3.3 kg/s. Para simular el área inflamable en ciertas condiciones, se consideraron las propiedades del propano. Los datos para la simulación se encuentran en la tabla 7.15.

Tabla 7.15. Datos para la simulación de la fuga de Gas L.P desde el espacio del líquido.

Datos de entrada al programa	Valor
Presión de almacenamiento (bar)	17.2
Temperatura en el punto de liberación (K)	231
Diámetro del agujero (mm)	12.7
Duración de la fuga* (s)	600
Fracción en masa de líquido inicial (%)	85
Tasa de emisión de líquido presurizado (kg/s)	3.3
Límite inferior de explosividad para el Gas L.P. (ppm)	18,000
Rugosidad del terreno (rural plano) (m)	0.1
Altura de la fuente** (m)	1.5

*Tiempo de liberación considerando un escenario común en los eventos de pérdida de contención de un tanque presurizado (BEVI, 2009).

** Se considera que agujero se encuentra a 1.5 m sobre el nivel del suelo.

Se simuló la fuga desde el nivel del líquido con los escenarios meteorológicos que corresponden a condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima, teniendo como resultados las concentraciones plasmadas en la siguiente gráfica.

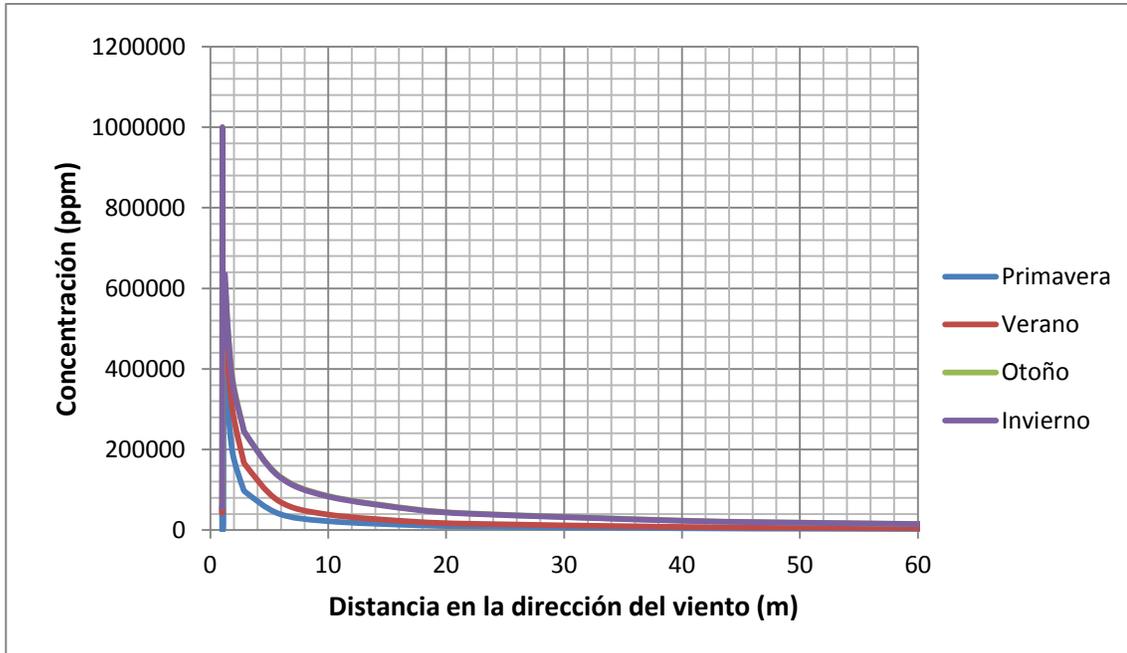


Figura 7.25. Concentración en la dirección del viento en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ para cada escenario meteorológico, por fuga desde el espacio del líquido.

En la figura 7.25 se observa que las mayores concentraciones en la dirección del viento, se tienen en otoño e invierno en esas condiciones, con un valor máximo de 1,000,000 ppm a 1 m de la fuente. El área inflamable para cada estación del año se muestra en las figuras 7.26, 7.27, 7.28 y 7.29.



Figura 7.26. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en primavera, por fuga desde el espacio del líquido.

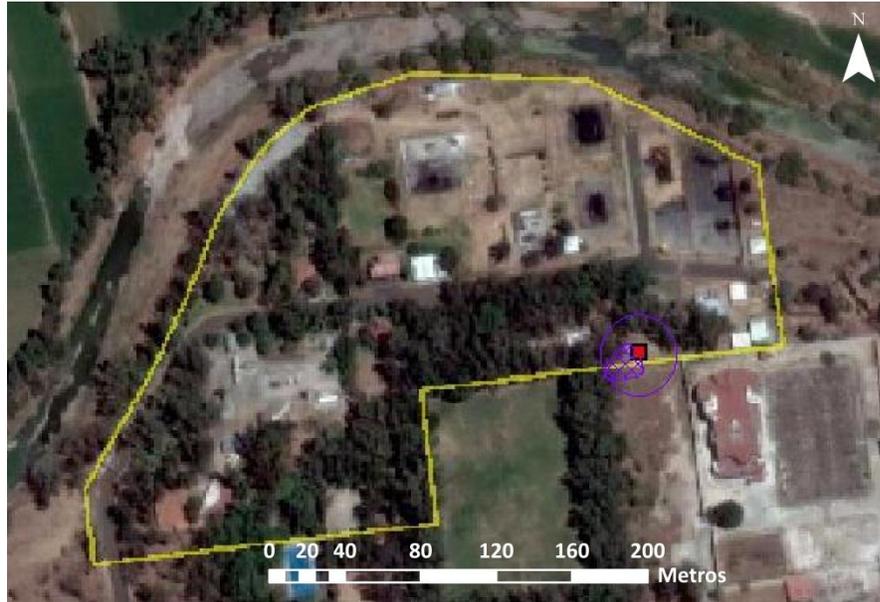


Figura 7.27. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en verano, por fuga desde el espacio del líquido.



Figura 7.28. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en otoño, por fuga desde el espacio del líquido.



Figura 7.29. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en Invierno, por fuga desde el espacio del líquido.

Las distancias máximas a las que se encuentra el límite inferior de inflamabilidad del Gas L.P, para los diferentes escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$, por la fuga desde el espacio del líquido, se encuentran representados en la tabla 7.16.

Tabla 7.16. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gas L.P. en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$, por fuga desde el espacio del líquido.

Concentración (ppm)	Distancia máxima desde la fuente (m)			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Límite inferior de inflamabilidad del Gas L.P. = 18,000	12	20	52	52

En la tabla anterior se puede observar que las distancias máximas de concentración son mayores en las estaciones de otoño e invierno.

Los resultados de concentración de la fuga desde el espacio del líquido para los escenarios meteorológicos que corresponden a condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima, se presentan a continuación.

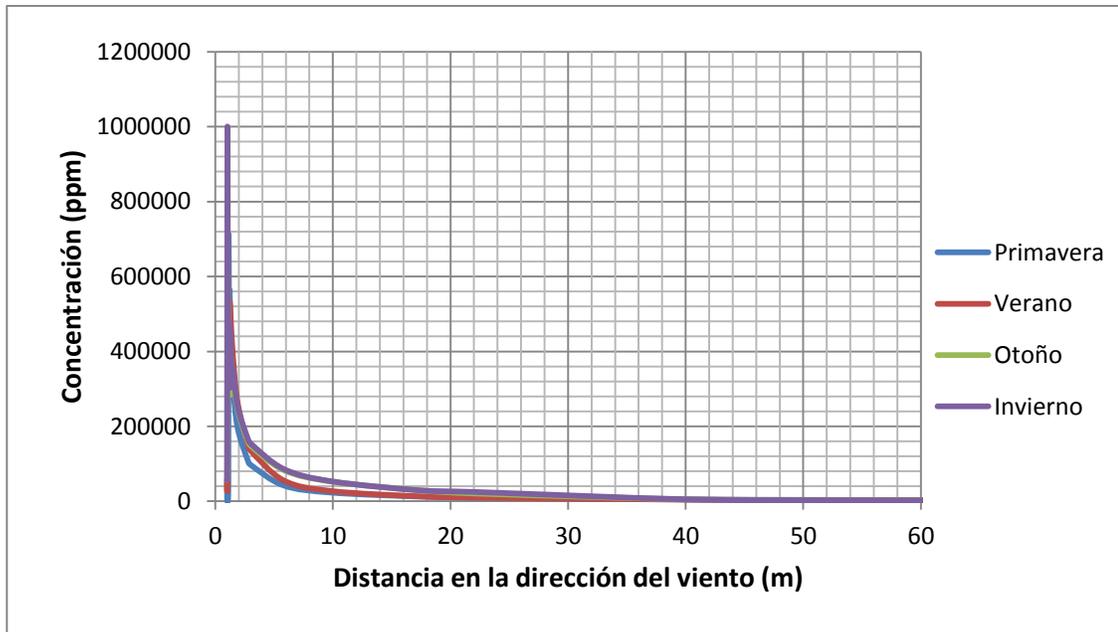


Figura 7.30. Concentración en la dirección del viento en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ para cada escenario meteorológico, por fuga desde el espacio del líquido.

En la figura 7.30 se observa que en las estaciones de otoño e invierno se presentan mayores concentraciones con respecto a primavera y verano, con valores máximos de 1,000,000 ppm, a 1 m de la fuente. A continuación se presentan las figuras donde se plasma el área inflamable para dichas condiciones meteorológicas (figuras 7.31, 7.32, 7.33 y 7.34).



Figura 7.31. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en primavera, por fuga desde el espacio del líquido.



Figura 7.32. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en verano, por fuga desde el espacio del líquido.



Figura 7.33. Área inflamable en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$ en otoño, por fuga desde el espacio del líquido.

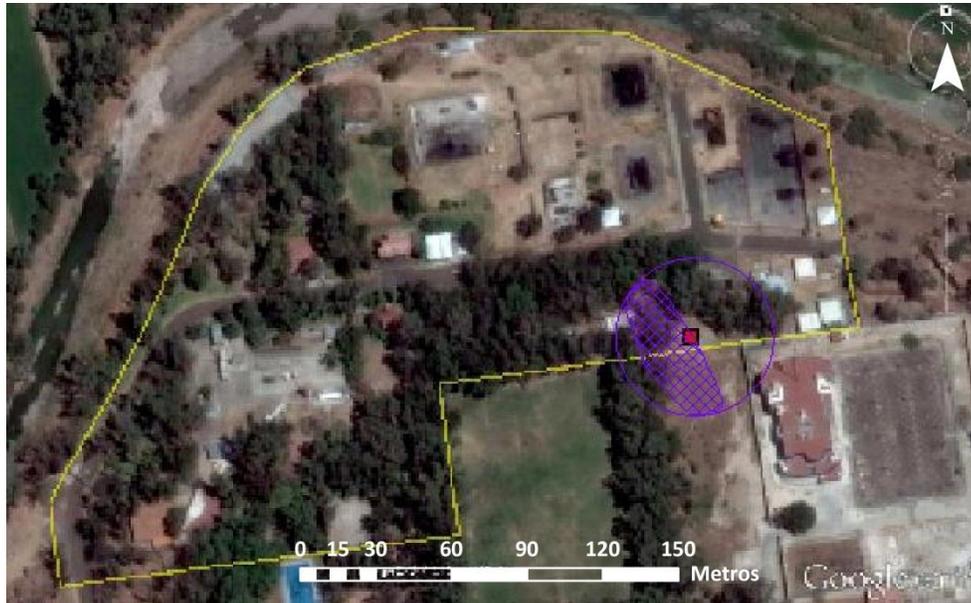


Figura 7.34. Área inflamable en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$ en invierno, por fuga desde el espacio del líquido.

Las distancias a las que se encuentra la zona inflamable, para los diferentes escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$ por fuga desde el espacio del líquido, se encuentran representados en la tabla 7.17.

Tabla 7.17. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gas L.P. en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$, por fuga desde el espacio del líquido.

Concentración (ppm)	Distancia máxima desde la fuente (m)			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Límite inferior de inflamabilidad de Gas L.P. = 18,000	12	14	33	34

En la tabla anterior se puede observar que las distancias máximas de concentración son mayores en otoño e invierno.

7.6.2 Nube explosiva de Gas L.P.

Al formarse una nube de Gas L.P. encontrándose dentro de los límites de explosividad, y con un aporte de energía de activación que puede provenir de una chispa por carga estática, por fuego cercano a la nube, etc., además de la radiación que provocaría la

deflagración de la nube, se generaría una onda de sobrepresión que puede abarcar grandes distancias y provocar daños a su alrededor.

La simulación de los daños por sobrepresión que generaría una nube explosiva de Gas L.P. considera el modelo equivalente en TNT.

Existen diferencias entre el TNT y una explosión de nube de vapor. El TNT tiene una mayor densidad explosiva mientras que las nubes de vapor no la tienen. Las explosiones de TNT son detonaciones y las explosiones de nube de vapor son deflagraciones. Por lo tanto, la forma y velocidad de las ondas de choque son diferentes, esto hace que el método no sea exacto, pero se tienen mejores aproximaciones si es aplicado en un campo abierto (Casal, 2008). En lo que respecta a las condiciones del sitio de estudio, se encuentra que es un sitio al aire libre por lo que el método puede ser aplicable.

Para conocer la cantidad de masa explosiva presente durante la liberación del Gas L.P., se realizó una simulación con el programa EFFECTS para encontrar la máxima cantidad de masa explosiva liberada en un cierto tiempo, resultando en una cantidad de **125.41 kg** a **100 s** de liberación continua. Con dicha cantidad se procedió a la determinación de los radios de afectación en el programa SCRI-Fuego, considerando las propiedades fisicoquímicas y energéticas del propano.

Para representar las zonas de afectación por onda de choque generada en este tipo de escenario, se tomaron en cuenta 4 niveles de sobrepresión con su respectivo grado de afectación (TNO, 2012):

- Destrucción total (83 kPa).
- Grave (35-85 kPa)
- Moderado (17-35 kPa)
- Menor (17-3.5 kPa).

Para este tipo de evento no se consideran las condiciones meteorológicas. Realizando la simulación, el programa SCRI arroja los siguientes radios de afectación mostrados en la figura 7.35.



Figura 7.35. Radios de afectación por nube explosiva de Gas L.P.

Atendiendo a los niveles de sobrepresión, en la siguiente tabla se muestran las distancias de afectación ocasionadas por dicho evento accidental.

Tabla 7.18. Distancias de afectación por sobrepresión generada en la nube explosiva de Gas L.P.

Código de color	Sobrepresión (kPa)	Distancia (m)
	83	12
	35	19
	17	30
	3.5	101

Como se puede observar en la tabla 7.18, el daño más grave por sobrepresión se da cerca de la fuente. Es importante comentar que el modelo de simulación considera un confinamiento del 100% de la nube de Gas L.P., lo cual no es real, pues se supone, el material ha sido liberado continuamente al medio ambiente donde no hay barreras suficientes para un confinamiento total. Considerando lo anterior, se podrían esperar consecuencias menores a las calculadas, sin embargo, este escenario no será tomado en cuenta para el cálculo del riesgo total de la instalación, pues como ya se había mencionado, dicho escenario tiene una frecuencia de cero.

7.6.3 BLEVE

Para la simulación de una explosión tipo BLEVE es interesante conocer tanto la radiación generada como la sobrepresión debida al estallido del tanque.

Como dato de entrada al programa, se calculó la masa del material en la nube, asumiendo que al producirse una fuga de la sustancia, todo el material pasa a la fase gaseosa (Dinámica Heurística , 2012). Para el cálculo se utilizó la densidad del líquido (1L de Gas L.P. = 0.59 kg) a su temperatura de ebullición, el volumen del tanque y su porcentaje de llenado.

La simulación para obtener los efectos por radiación de la bola de fuego generada en la explosión tipo BLEVE se realizaron bajo las condiciones que se muestran en la tabla 7.19, considerando además las propiedades del propano para el estudio.

Tabla 7.19. Datos de entrada al programa para la simulación de la radiación generada por la bola de fuego.

Datos de entrada		Valor
Masa inflamable (kg)		2,506
Tiempo de exposición* (s)		20
Radiación** (kW/m ²)	LC ₁	9.8
	LC ₅₀	19.5
	LC ₉₉	35

*Tiempo máximo de exposición a la radiación (Casal, 2008).

**Los niveles de radiación son expresados en una concentración letal donde para 35, 19.5 y 9.8 kW/m², se tiene un porcentaje de mortalidad del 99, 50 y 1%, respectivamente (BEVI, 2009).

Se realizaron simulaciones en los escenarios meteorológicos que ya se han mencionado en apartados anteriores. Para condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima, los resultados de dosis de radiación se presentan en la figura 7.36.

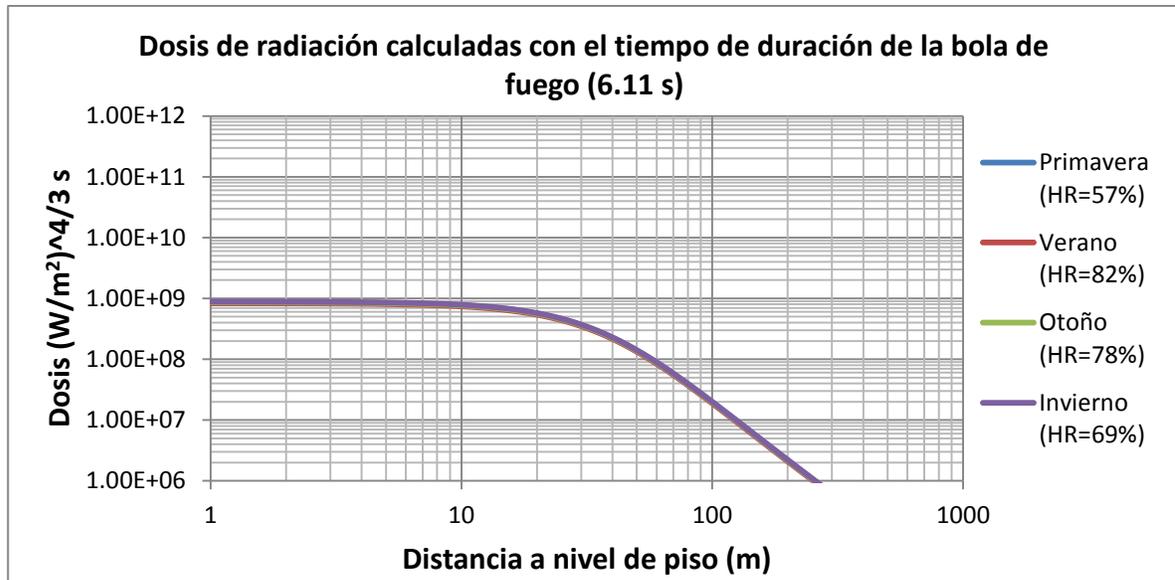


Figura 7.36. Dosis de radiación generada por la bola de fuego, en condiciones de T_{\min} y $H_{R\max}$ para todas las estaciones.

Observando la figura 7.36, se puede decir que las dosis de radiación que genera este tipo de evento en las diferentes estaciones para condiciones de T_{\min} y $H_{R\max}$, y para un tiempo de duración de la bola de fuego de 6.11 s, no varían significativamente entre cada estación. En la figura 7.37 se muestra el área afectada por la radiación.



Figura 7.37. Radios de afectación por radiación de la bola de fuego en condiciones de T_{\min} y $H_{R\max}$.

Los resultados de la simulación indican que la bola de fuego que se forma con la cantidad de material inflamable en el tanque, tiene un diámetro de 79 m, una altura hasta el centro de la bola de fuego de 59 m y una duración de 6.11 s. En la tabla 7.20 se muestra la radiación que se genera a diferentes distancias, así como la dosis de radiación calculada con un tiempo de exposición de 20 s. Las distancias corresponden a los radios de afectación de la figura 7.37.

Tabla 7.20. Radiación y dosis en condiciones de T_{\min} y $H_{R\max}$.

Código de color	Distancia (m)	Radiación (kW/m^2)	Dosis (W/m^2) ^{4/3} s
	96	35	2.29×10^7
	123	19.5	1.05×10^7
	164	9.8	4.19×10^6

La simulación de los radios de afectación en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima, arrojaron los resultados de dosis de radiación mostrados en la figura 7.38.

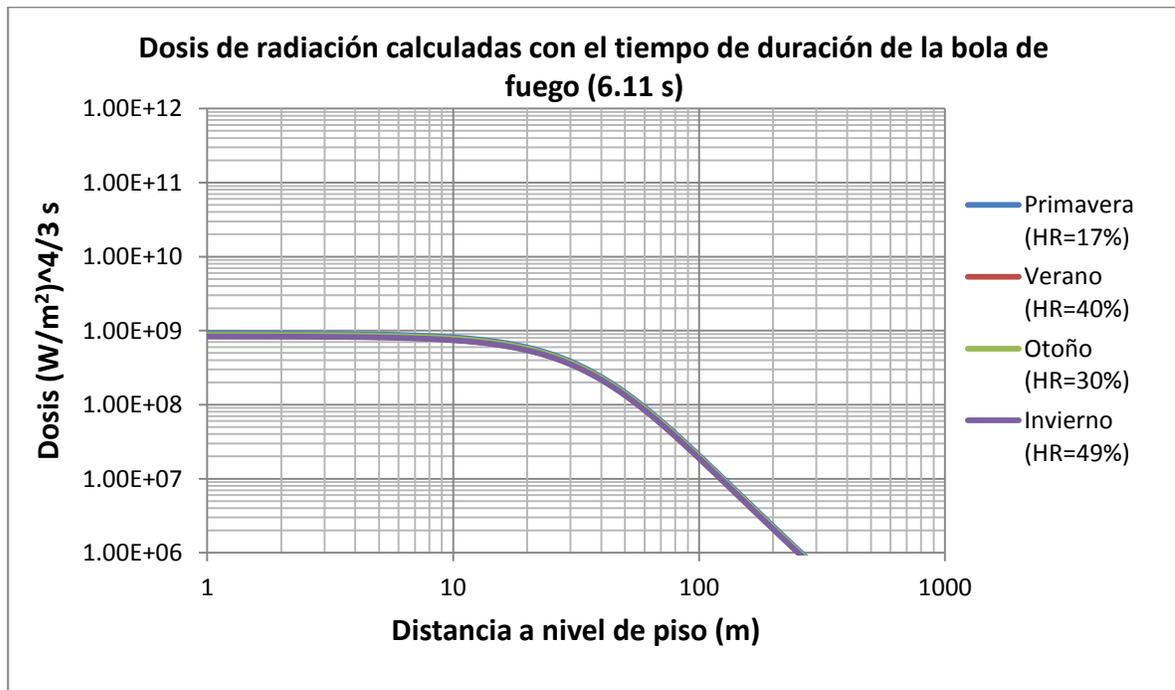


Figura 7.38. Dosis de radiación generada por la explosión tipo BLEVE del tanque de Gas L.P., en condiciones de T_{\max} y $H_{R\min}$ para todas las estaciones.

En la figura anterior, se observa que las dosis de radiación calculadas en dichas condiciones meteorológicas, no presentan variación significativa. El área afectada por la radiación se tiene en la figura 7.39.



Figura 7.39. Radios de afectación por radiación de la bola de fuego en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$.

La bola de fuego que se forma en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima para cada estación del año, tiene un diámetro 79 m y una duración de 6.11 s. Se observa que tiene las mismas dimensiones que en las condiciones calculadas anteriormente, pues es el mismo material inflamable para todos los escenarios meteorológicos.

En la tabla 7.21 se muestra la radiación que se genera a diferentes distancias, así como la dosis de radiación calculada con un tiempo de exposición de 20 s. Las distancias corresponden a los radios de afectación de la figura 7.39.

Tabla 7.21. Radiación y dosis en condiciones de $T_{\text{máx}}$ y $H_{\text{Rmín}}$.

Código de color	Distancia (m)	Radiación (kW/m^2)	Dosis (W/m^2) ^{4/3} s
	97	35	2.29×10^7
	124	19.5	1.05×10^7
	165	9.8	4.19×10^6

Las distancias de afectación, son ligeramente mayores en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima, debido a que la nube se transporta con mayor facilidad en estas condiciones.

Sobrepresión por explosión tipo BLEVE

En este apartado se simuló la sobrepresión que causaría la explosión tipo BLEVE. Para los cálculos se utilizaron los datos de la tabla 7.22, recordando que se tiene la masa de material inflamable dentro del tanque con un valor de 2,506 kg, el cual equivale a 739 kg de TNT. En este caso el nivel de confinamiento es del 100% pues se supone que la explosión se da repentinamente cuando el material se encuentra dentro del tanque.

Tabla 7.22. Datos para la simulación de la sobrepresión generada en la explosión tipo BLEVE.

Datos de entrada al programa	Valor
Volumen del tanque (L)	5,000
Masa de material en la nube (kg)	2,506
Factor de eficiencia (%)	3

En este caso, el programa no requiere datos meteorológicos para llevar a cabo los cálculos, pues éstos no están involucrados en las ecuaciones que modelan este tipo de escenario.

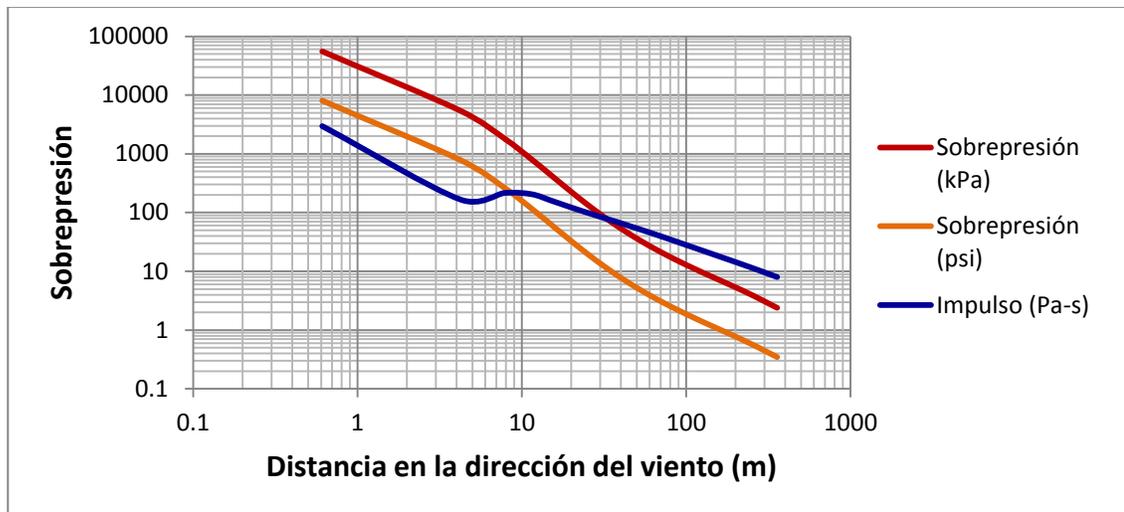


Figura 7.40. Sobrepresión generada en la explosión del tanque de gas licuado de petróleo.

En la figura 7.40 se observa que la presión decae con la distancia. En un principio, la presión se encuentra en condiciones ambientales (101.325 kPa) y aumenta abruptamente con la onda de choque. El impulso que genera la onda de sobrepresión decae hasta cerca de la presión ambiental para volver a aumentar a una distancia de aproximadamente 5 m, y eventualmente vuelve a caer. A continuación se muestra una imagen con los radios de afectación generados por la sobrepresión de este evento (figura 7.41).

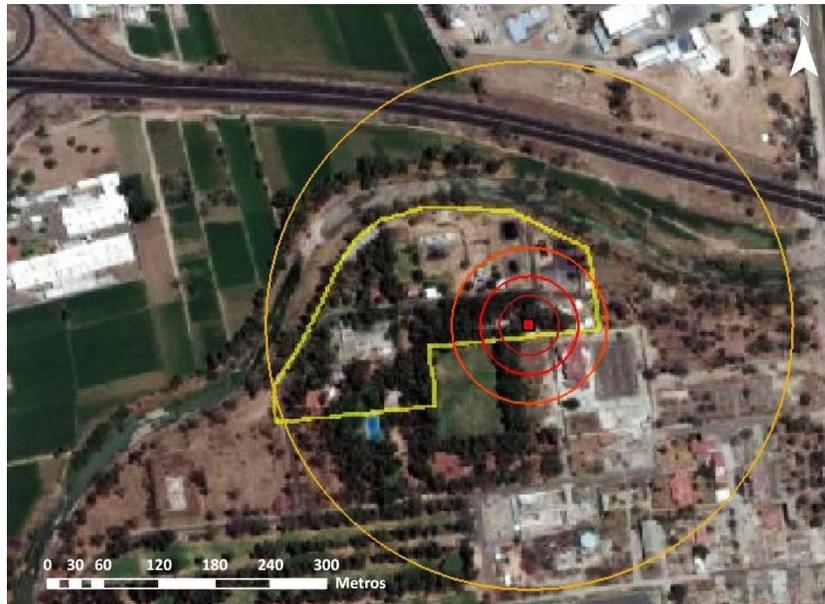


Figura 7.41. Radios de afectación por sobrepresión generada en la explosión del tanque de gas licuado de petróleo.

En la tabla 7.23 se muestran las distancias de afectación por sobrepresión para cada nivel, las cuales corresponden a los radios de afectación de la figura 7.41.

Tabla 7.23. Distancias de afectación por sobrepresión.

Código de color	Sobrepresión (kPa)	Distancia (m)
	83	32
	35	51
	17	82
	3.5	275

En la tabla 7.24 se muestran la presión ocasionada por la onda de choque a diferentes distancias desde la fuente, así como el tiempo de llegada de la misma, con su respectivo impulso y su duración. Esta información indica que los tiempos en los que la

onda de choque puede llegar a cierta distancia, son muy bajos con presiones altas que pueden provocar daños irreversibles en las personas expuestas, conforme se encuentren más cerca de la fuente.

Tabla 7.24. Resultados de la simulación de sobrepresión por nube explosiva de Gas L.P.

Distancia (m)	Presión (psi)	Tiempo de llegada (ms)	Impulso específico (Pa-s)	Duración del impulso (ms)
21.10	29.01	2.26	116.33	2.17
24.03	21.76	2.86	103.32	2.48
34.77	10.15	5.42	74.65	3.35
41.63	7.25	7.25	63.76	3.66
59.19	4.35	11.39	48.66	4.10
73.18	2.90	16.43	37.99	4.47
89.58	2.18	21.38	31.29	4.77
161.31	1.02	43.66	17.72	5.74
274.54	0.51	79.95	10.50	6.63

7.6.4 Llamada con Gasolina

Para la simulación de este escenario en el dique donde se encuentran los tanques de Gasolina y Diésel, se considera lo siguiente:

- El material derramado en el dique de concreto es gasolina por ser una sustancia volátil en comparación con el diésel, aproximando el cálculo con las propiedades fisicoquímicas y energéticas del n-Octano.
- Se supone un valor de velocidad del viento de 2 m/s para las estaciones de otoño e invierno debido a que 1 m/s no es suficiente para formar una nube de vapores de gasolina con características inflamables, además es un valor que de acuerdo a los datos meteorológicos del sitio, es probable que se presente.
- El derrame de gasolina proviene del tanque de mayor capacidad.

Se realizaron algunos cálculos de los datos de entrada para el programa SCRI tales como: el flujo másico y el tiempo de vaciado del tanque. Para el cálculo del flujo másico se requería conocer primero la velocidad de salida (v) de la sustancia, la cual se obtuvo utilizando la ecuación (7.6) de Bernoulli (Koehler, 1984):

$$v = \sqrt{2gh} \quad (7.6)$$

Donde

g: Es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

h: Es el nivel de la sustancia en el tanque (m)

Enseguida se calculó el caudal utilizando el dato del área de escape y la velocidad de salida. Con la densidad de la sustancia se obtuvo finalmente el flujo másico.

El tiempo de vaciado del tanque depende de la geometría del tanque, por lo que se utilizó la expresión para un tanque cilíndrico horizontal con tapas semielípticas (Alderetes, et al., 2004), la cual se presenta a continuación (ecuación 7.7).

$$t = \frac{\sqrt{8}}{3C_d A_0 \sqrt{g}} \left\{ L \left[D^{\frac{3}{2}} - (D - h)^{\frac{3}{2}} \right] + \frac{\pi b}{D} h^{\frac{3}{2}} \left(D - \frac{3}{5} h \right) \right\} \quad (7.7)$$

Donde

C_d: Es el coeficiente de descarga, 0.65

A₀: área del orificio (m²)

L: Longitud del tanque (m)

D: Diámetro del tanque (m)

b: Ancho de tapa (m)

Los resultados de flujo másico y tiempo de descarga del tanque se encuentran en la tabla 7.25.

Para obtener la superficie del derrame se tomó en cuenta el área del dique, 272 m², pero debido a que en éste se encuentran dos tanques verticales cuya base abarca parte del área superficial del dique, se consideró restar el área de la base de ambos tanques, obteniendo una superficie de 266 m².

Tabla 7.25. Datos para la simulación de la llamarada con Gasolina.

Datos de entrada al programa	Valor
Límite inferior de inflamabilidad de la Gasolina (ppm)	14,000
Flujo másico (kg/s)	16.4
Diámetro del orificio (in)	3
Tiempo de descarga (s)	505
Superficie del derrame (m ²)	266

Se efectuaron las simulaciones para encontrar el área inflamable por llamarada de Gasolina en las diferentes estaciones del año según condiciones meteorológicas de temperatura mínima y humedad relativa máxima. Los resultados se encuentran en las figuras 7.42, 7.43, 7.44 y 7.45.



Figura 7.42. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de T_{\min} y $H_{R\max}$ en primavera.



Figura 7.43. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en verano.



Figura 7.44. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en otoño.



Figura 7.45. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en invierno.

Las distancias máximas a las que se encuentra el límite inferior de inflamabilidad de la Gasolina, para los diferentes escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$, se encuentran representados en la tabla 7.26.

Tabla 7.26. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$.

Concentración (ppm)	Distancia máxima desde la fuente (m)			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Límite inferior de inflamabilidad de la Gasolina= 14,000	9	33	122	123

En la tabla anterior se puede observar que las distancias máximas de concentración son mayores en las estaciones de otoño e invierno.

En seguida se tienen los resultados de las simulaciones de llamarada con Gasolina en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima, se presentan en las figuras 7.46, 7.47, 7.48 y 7.49.



Figura 7.46. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en primavera.



Figura 7.47. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en verano.

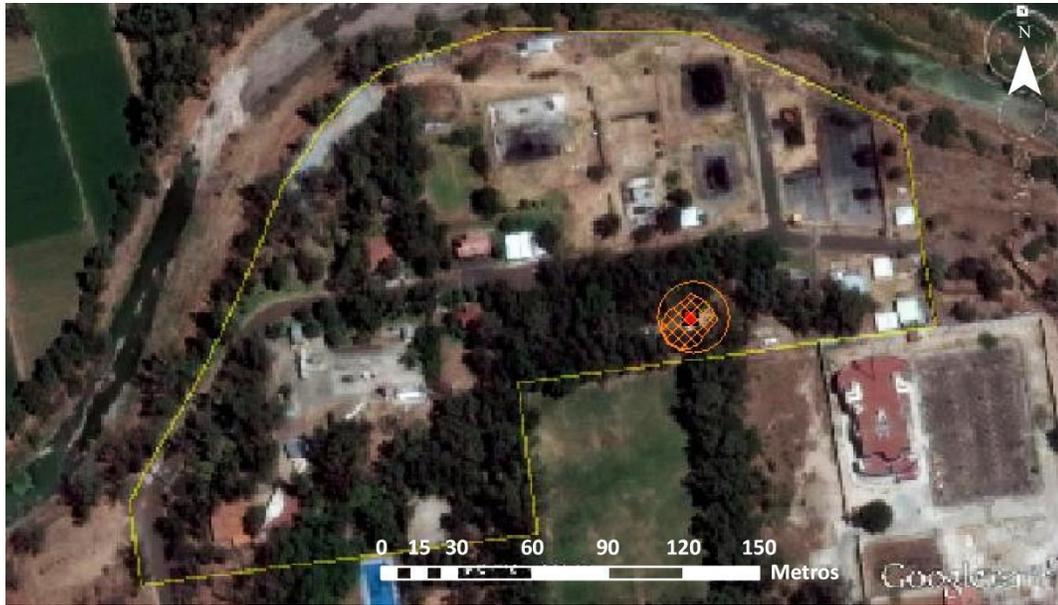


Figura 7.48. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en otoño.



Figura 7.49. Área inflamable por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ en invierno.

Las distancias máximas a las que se encuentra la zona inflamable, para los diferentes escenarios meteorológicos en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$, por llamarada de Gasolina, se encuentran representados en la tabla 7.27.

Tabla 7.27. Distancias máximas de afectación por llamarada de Gasolina en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$.

Concentración (ppm)	Distancia máxima desde la fuente (m)			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Límite inferior de inflamabilidad de la Gasolina= 14,000	11	13	16	16

En la tabla anterior se puede observar que las distancias máximas de concentración son mayores en otoño e invierno.

7.6.5 Incendio de charco

Los incendios de charco tienden a ser localizados y la principal preocupación son los efectos dominó que pueden provocar, más que por riesgos a la comunidad. La radiación térmica es uno de los efectos principales de este tipo de eventos.

La simulación de un incendio de este tipo en el sitio de estudio se realizó bajo el mismo supuesto que en el escenario de llamarada. El derrame de material inflamable proviene del tanque de mayor capacidad que contiene gasolina, éste tiene un volumen máximo de 9,068 L, considerando que el porcentaje de llenado es del 50%, se tendría un volumen derramado de aproximadamente 4,500 L. La sustancia escapa a través de un orificio de 3 pulgadas y la superficie cubierta por el derrame es de 266 m².

Es importante mencionar que debido a la cercanía de los tanques dentro del dique, es muy probable que al haber un incendio con el material derramado inicialmente, la radiación generada impacte a los tanques vecinos, provocando así que el combustible se incorpore al incendio. Este supuesto no afectará considerablemente las dimensiones del incendio, pero puede influir en la duración del mismo.

Tabla 7.28. Datos para la simulación del incendio de charco.

Datos de entrada al programa	Valor
Área del dique (m ²)	272
Altura del dique (cm)	70
Altura del charco sobre el nivel del suelo (cm)	2
Superficie del incendio (m ²)	266

Se realizaron simulaciones en condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima y los resultados de radiación desde el nivel del piso fueron los siguientes.

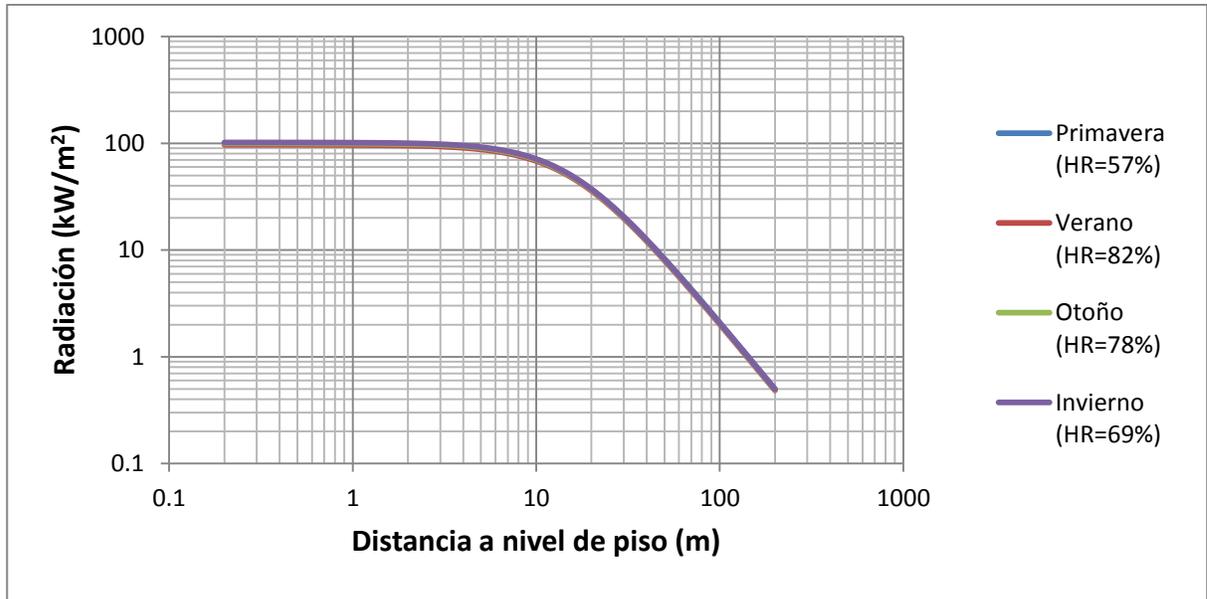


Figura 7.50. Radiación generada por el incendio de charco en distancias a nivel de piso, en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$ para todas las estaciones.

De la figura 7.50, se puede observar que la radiación que genera este tipo de evento en diferentes distancias desde el nivel de piso, en las diferentes estaciones para condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$, no varían significativamente entre cada estación.

La altura de la flama del incendio de charco es de 31 m y la tasa de combustión total con un valor de 21 kg/s. En la figura 7.51 se muestran los radios de afectación por el incendio.



Figura 7.51. Radios de afectación por radiación del incendio de charco en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$.

En la tabla 7.29 se muestra la radiación que se genera a diferentes distancias a nivel de piso. El nivel de radiación. Las distancias corresponden a los radios de afectación de la figura 7.51.

Tabla 7.29. Radiación a nivel de piso, generada por el incendio de charco en condiciones de $T_{\text{mín}}$ y $H_{\text{Rmáx}}$.

Código de color	Distancia (m)	Radiación (kW/m^2)
	23	35
	33	19.5
	48	9.8

La simulación de los radios de afectación en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima, arrojaron los resultados de radiación en distancias a nivel de piso mostrados en la figura 7.52.

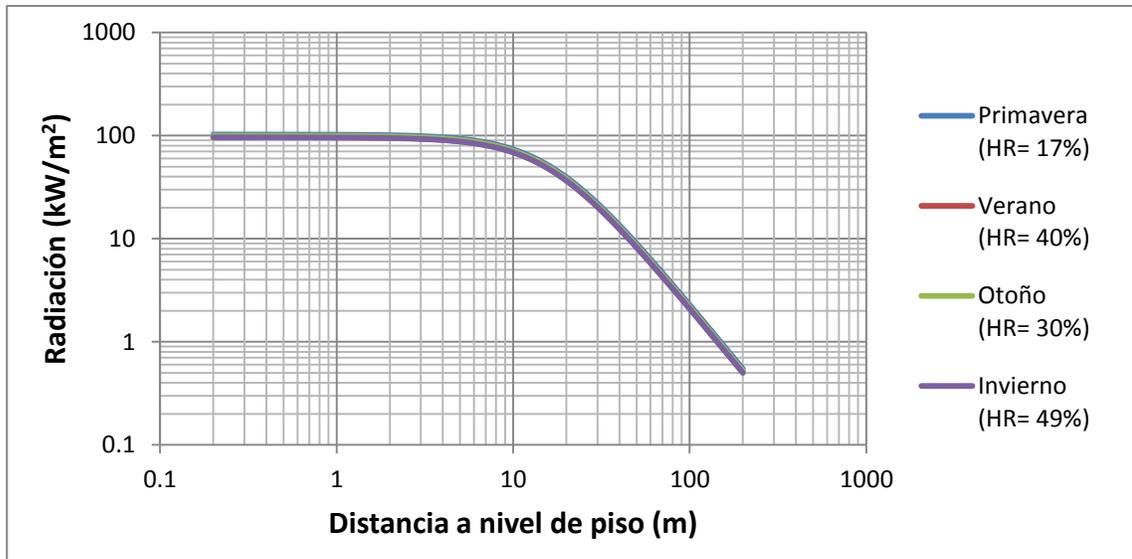


Figura 7.52. Radiación generada por el incendio de charco en distancias a nivel de piso, en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$ para todas las estaciones.

En la figura 7.52, se puede observar que la radiación que generada en el incendio de charco en diferentes distancias a nivel de piso, en las estaciones del año para condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$, no varían significativamente entre cada estación. La altura de la flama del incendio de charco es de 32 m y en la figura 7.53 se muestran los radios de afectación por el incendio en dichas condiciones meteorológicas.



Figura 7.53. Radios de afectación por radiación del incendio de charco en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n}$.

En la tabla 7.30 se muestra la radiación que se genera a diferentes distancias a nivel de piso. El nivel de radiación. Las distancias corresponden a los radios de afectación de la figura 7.53.

Tabla 7.30. Radiación a nivel de piso, generada por el incendio de charco en condiciones de $T_{m\acute{a}x}$ y $H_{Rm\acute{i}n.}$.

Código de color	Distancia (m)	Radiación (kW/m ²)
	24	35
	34	19.5
	50	9.5

Las distancias de afectación, son ligeramente mayores en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima, debido a que la nube se transporta con mayor facilidad en estas condiciones.

Una vez realizando el análisis de consecuencias con el programa SCRI bajo los escenarios meteorológicos mencionados, se puede concluir que las condiciones meteorológicas en el que se dan las mayores distancias de afectación en cuanto a llamarada de Gas L.P. y de Gasolina, son en condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima en la estación de invierno. Por otro lado, la llamarada por fuga de Gas L.P., presenta mayores distancias de afectación si la fuga se da desde el espacio del líquido, por lo que éste será analizado con los programas ALOHA y EFFECTS.

Si bien, hay una diferencia en cuanto a las distancias de afectación generadas en los escenarios de explosión tipo BLEVE e incendio de charco bajo las diferentes condiciones meteorológicas, dicha diferencia no es significativa.

Por lo anterior, en los siguientes apartados se realizarán las simulaciones de los escenarios accidentales bajo condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima en la estación de otoño, con los programas ALOHA y EFFECTS.

7.7 Análisis de consecuencias con el programa ALOHA

En esta sección se presenta el análisis de consecuencias utilizando el programa ALOHA. Los escenarios accidentales fueron simulados, como ya se ha mencionado, en condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima en la estación de invierno, lo cual implica una atmósfera muy estable. A continuación se presentan los resultados.

Llamarada por fuga de Gas L.P. desde el espacio del líquido

Este escenario accidental fue simulado con los datos de la tabla 7.15, aproximando los cálculos con las propiedades del propano. Se tiene como resultado que la distancia máxima a la que se encuentra el límite inferior de explosividad para el Gas L.P., es de 103 m. El área inflamable se muestra en la figura 7.54.

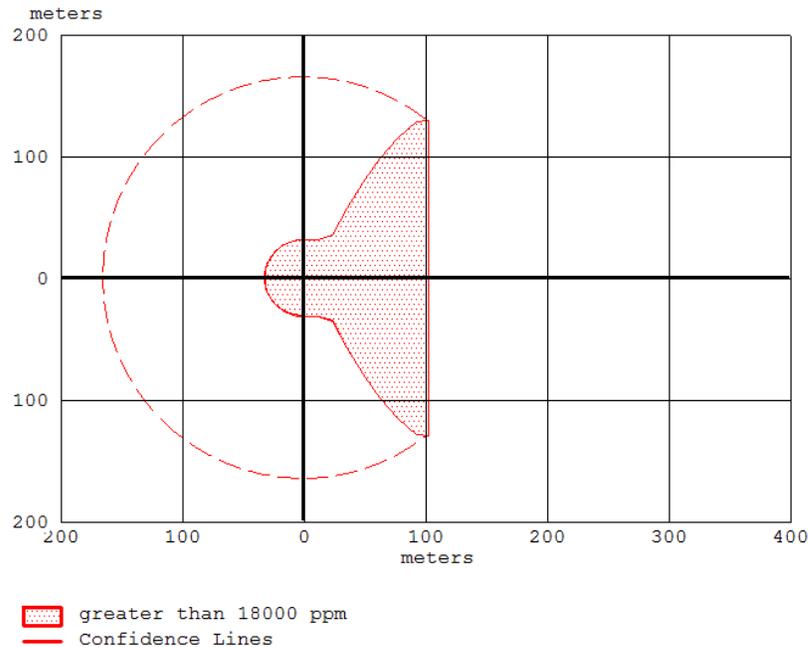


Figura 7.54. Área inflamable de la llamarada con Gas L.P. por fuga desde el espacio del líquido, utilizando el programa ALOHA.

Nube explosiva de Gas L.P.

La simulación de este escenario se ha realizado bajo el supuesto de que la nube de vapor de 125.41 kg, ha sido encendida por una chispa en un área congestionada y utilizando un modelo de gas más pesado que el aire, el programa ha arrojado las distancias de afectación para los distintos niveles de sobrepresión expresados en la figura 7.55.

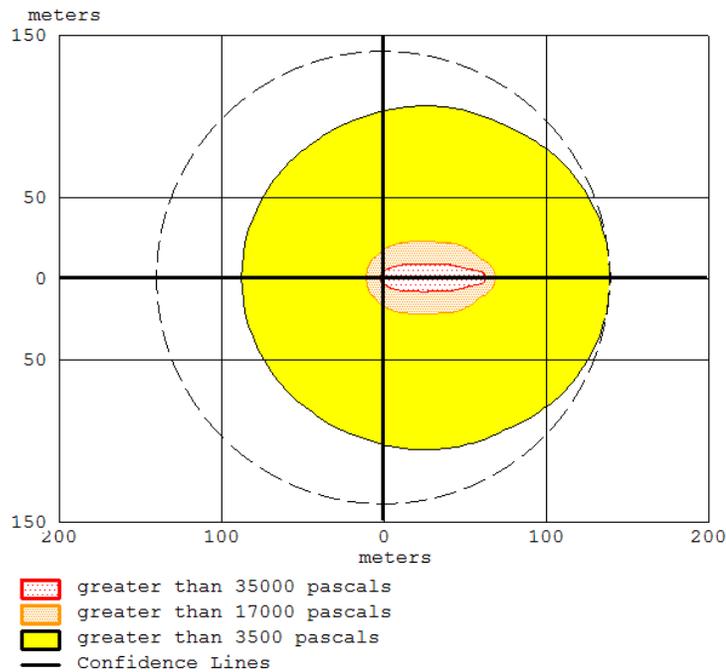


Figura 7.55. Radios de afectación por nube explosiva utilizando el programa ALOHA.

Las distancias máximas de afectación por la explosión de la nube se muestran en la tabla 7.31 y corresponden a los radios de afectación de la figura anterior.

Tabla 7.31. Distancias de afectación por sobrepresión generada por la nube explosiva de Gas L.P., dadas por el programa ALOHA.

Código de color	Sobrepresión (kPa)	Distancia (m)
	35	62
	17	68
	3.5	139

Debido a que el programa no arroja resultados para el nivel de sobrepresión donde habría una destrucción total (83 kPa), se supone que ese nivel se encuentra a menos de 62 m.

BLEVE

La simulación de este escenario se realizó bajo los supuestos del apartado 7.6.3 utilizando los datos de la tabla 7.19. Los resultados para la bola de fuego generada son los siguientes:

- Diámetro: 79 m
- Duración: 6 s

En la figura 7.56 se puede observar el área de afectación por radiación generada en dicho escenario, así como los resultados de radiación a diferentes distancias.

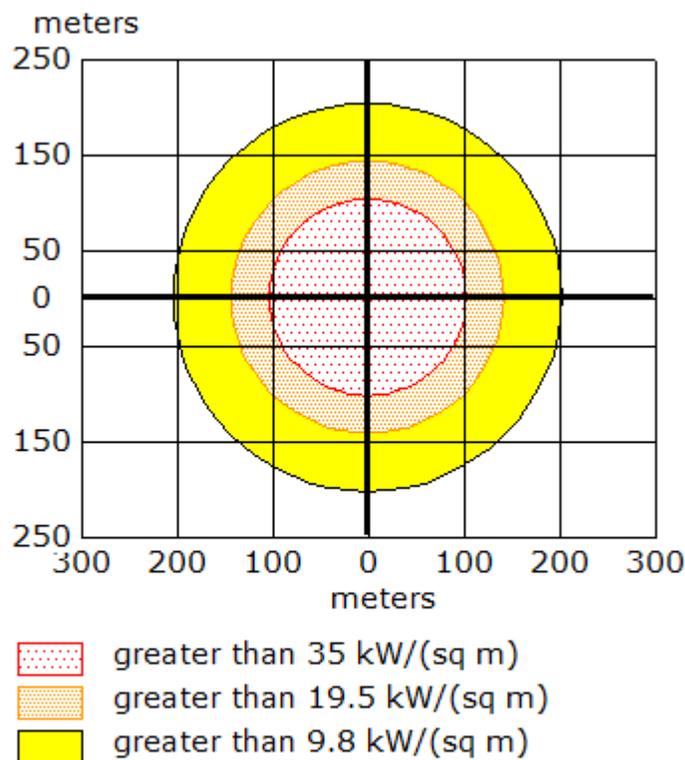


Figura 7.56. Radios de afectación por radiación generada por la bola de fuego, utilizando el programa ALOHA.

Las distancias máximas a las que se dan los distintos niveles de radiación se encuentran en la tabla 7.32 y éstos corresponden a los radios de afectación mostrados en la figura 7.56.

Tabla 7.32. Distancias de afectación por radiación generada por la bola de fuego, dadas por el programa ALOHA.

Código de color	Radiación (kW/m ²)	Distancia (m)
	35	103
	19.5	142
	9.8	203

Sobrepresión generada en la explosión tipo BLEVE

El área de afectación por sobrepresión que genera el estallido del tanque de Gas L.P., con una masa inflamable de 2,506 kg se muestra en la figura 7.57 para los distintos niveles de sobrepresión mencionados en apartados anteriores.

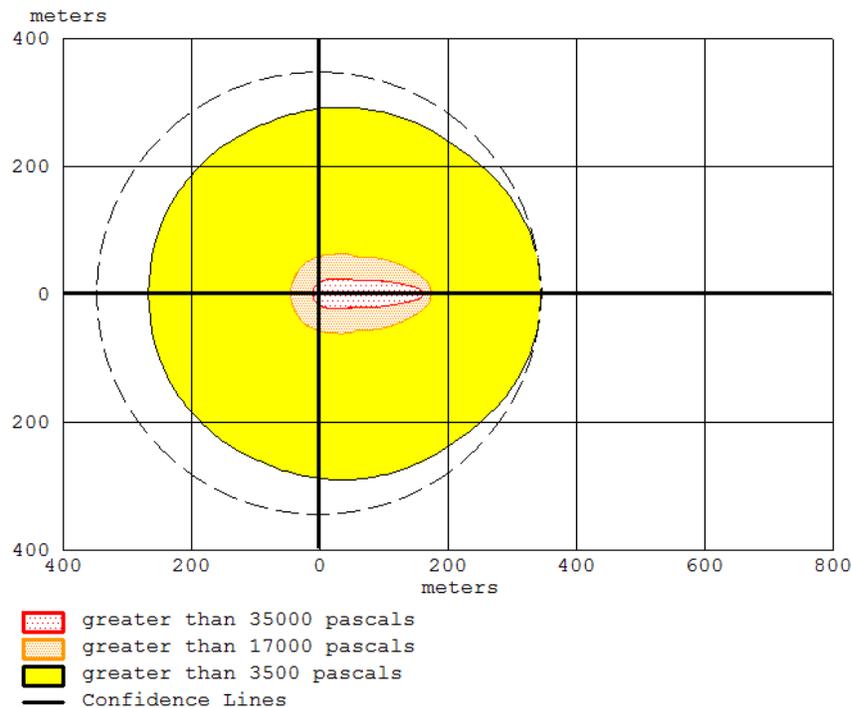


Figura 7.57. Radios de afectación por la sobrepresión generada en la explosión BLEVE utilizando el programa ALOHA.

Los resultados de la tabla 7.33 son las distancias de afectación por sobrepresión para los diferentes niveles en kilo pascals, correspondientes a la figura 7.57.

Tabla 7.33. Distancias de afectación por sobrepresión dadas por el programa ALOHA.

Código de color	Sobrepresión (kPa)	Distancia (m)
	35	163
	17	175
	3.5	347

El programa ALOHA no contempla el nivel de sobrepresión donde se tendría una destrucción total (83 kPa), por lo que se supone que éste se encuentra a menos de 163 m.

Llamarada con Gasolina

Al realizar la simulación con el programa ALOHA suponiendo también las consideraciones del apartado 7.6.4, se tiene que la dispersión de vapores no alcanza la concentración de 14,000 ppm, por lo que el área inflamable no puede ser representada.

Incendio de charco

El incendio de charco en el programa ALOHA se simuló tomando en cuenta los supuestos del apartado 7.6.5, aproximando los cálculos con la sustancia n-Octano. En este caso, el programa no genera resultados en cuanto a las dimensiones del fuego. El área afectada por la radiación se representa en la figura 7.58.

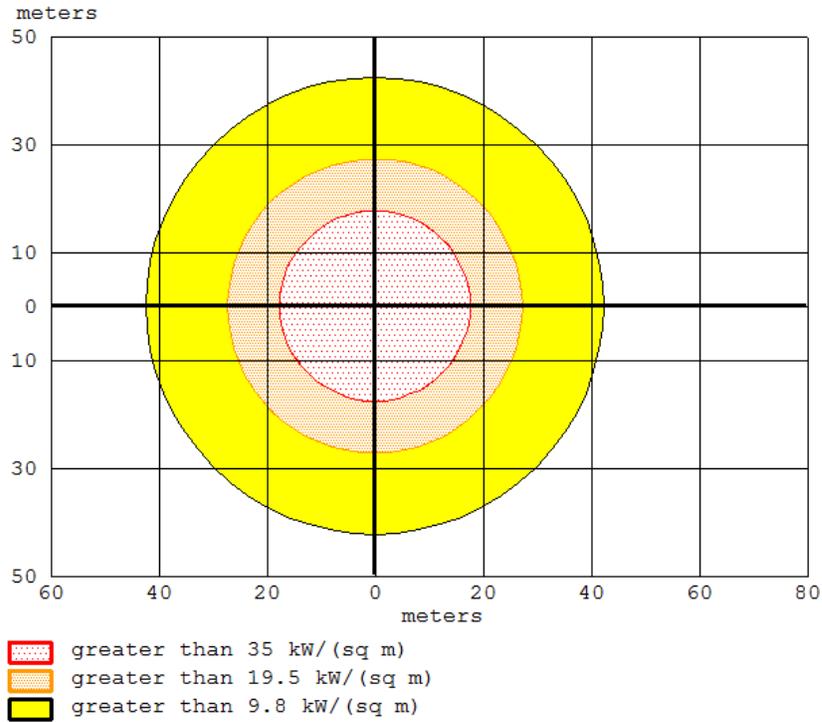


Figura 7.58. Radios de afectación por radiación generada en el incendio de charco, utilizando el programa ALOHA.

En la tabla 7.34 se encuentran las distancias máximas de afectación por radiación generada en el incendio de charco, con sus respectivos niveles de radiación expresada en kW/m^2 , haciendo referencia a la figura 7.58.

Tabla 7.34. Distancias de afectación por radiación generada en el incendio de charco, dadas por el programa ALOHA.

Código de color	Radiación (kW/m^2)	Distancia (m)
	35	19
	19.5	29
	9.8	44

7.8 Análisis de consecuencias con el programa EFFECTS

El análisis de consecuencias realizado con el programa EFFECTS, bajo condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima en la estación de invierno, arrojó los resultados que se muestran a continuación para los diferentes escenarios accidentales bajo estudio.

Llamarada de Gas L.P. por fuga desde el espacio del líquido

El escenario se simuló considerando los datos de la tabla 7.15. Los resultados de concentración se encuentran en la figura 7.59, donde se puede observar que se tienen concentraciones por encima de 1,000,000 ppm a 1 m.

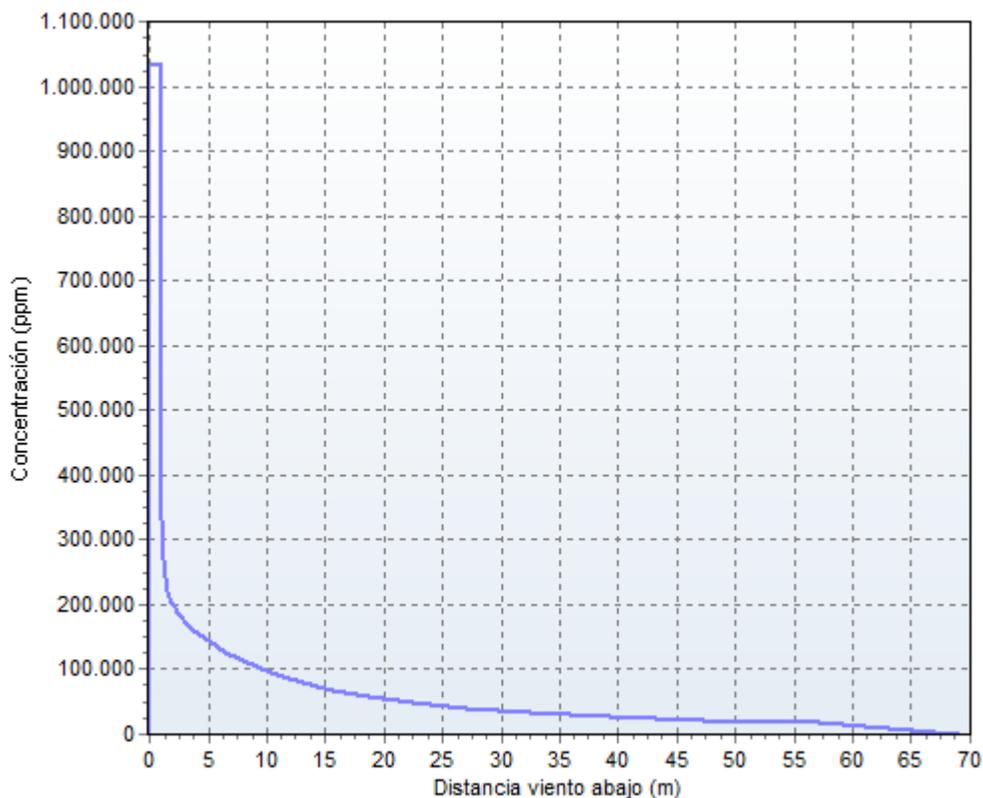


Figura 7.59. Concentración contra distancia viento abajo de la dispersión de nube de Gas L.P. utilizando el programa EFFECTS.

A continuación se tiene el área inflamable (figura 7.60) que se tendría con el límite inferior de inflamabilidad del Gas L.P. que es de 18,000 ppm.



Figura 7.60. Área inflamable por llamarada de Gas L.P. utilizando el programa EFFECTS.

Observando la figura 7.60, se tiene un área inflamable cuya distancia máxima de afectación se encuentra hasta 55 m de la fuente, con una pluma que se dirige hacia el sudoeste.

Nube explosiva de Gas L.P.

Las simulaciones se hicieron de acuerdo a las consideraciones del apartado 7.6.2. El programa EFFECTS tiene como modelo de simulación de nubes explosivas el método equivalente en TNT, recordando que se considera un nivel de confinamiento total, el cual no es real, se obtendrán distancias de afectación mucho mayores. Los radios de afectación obtenidos se muestran en la figura 7.61.



Figura 7.61. Radios de afectación por nube explosiva de Gas L.P., utilizando el programa EFFECTS.

En la tabla 7.35 se tienen las distancias máximas de afectación por sobrepresión para cada nivel de daño, éstas corresponden a los radios de afectación mostrados en la figura 7.6.

Tabla 7.35. Distancias de afectación por sobrepresión dadas por el programa EFFECTS.

Código de color	Sobrepresión (kPa)	Distancia (m)
	83	12
	35	20
	17	32
	3.5	99

Recordando los resultados para el análisis de consecuencias con el programa SCRI para dicho escenario, se puede observar que las distancias obtenidas con el EFFECTS son muy cercanas, esto se esperaba debido a modelo de simulación.

BLEVE

Como ya se ha mencionado, hay dos aspectos a estudiar de una Explosión por Expansión del vapor de un líquido en ebullición, estos son: la radiación y la sobrepresión. Los efectos por radiación se determinan a partir de la bola de fuego formada en dicho evento. Las dimensiones que se obtuvieron para la bola de fuego con el programa EFFECTS, fueron las siguientes:

- Diámetro: 83 m
- Altura al centro de la bola de fuego: 41 m
- Duración: 6.5 s

En la figura 7.62 se tiene una gráfica de radiación contra distancia, generada por la bola de fuego.

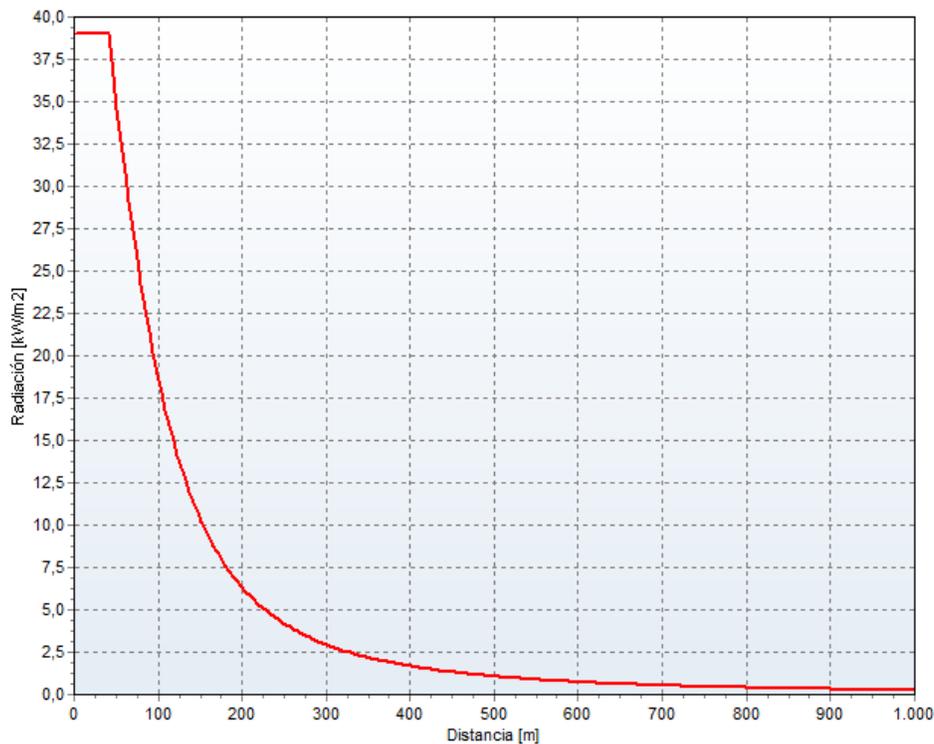


Figura 7.62. Radiación contra distancia por bola de fuego, utilizando el programa EFFECTS.

En la figura anterior se puede observar como la radiación va disminuyendo conforme se aleja de la fuente, teniendo un valor máximo cercano a los 40 kW/m² que se mantiene desde la fuente hasta 60 m.

En la figura 7.63 se representan los tres niveles de radiación, donde el nivel de radiación inferior abarca más de la mitad del predio, con un nivel de radiación máxima localizada cerca de la fuente, donde se tendría el 99 % de letalidad.

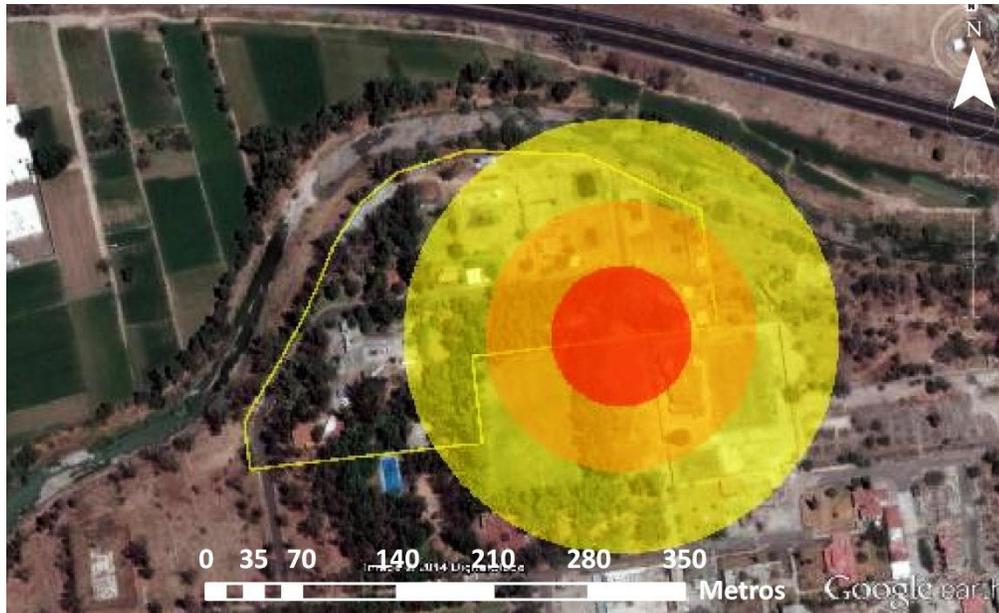


Figura 7.63. Radios de afectación por radiación generada por la bola de fuego, utilizando el programa EFFECTS.

Las distancias de afectación dadas para cada nivel de radiación, se tienen en la tabla 7.36, las cuales hacen referencia a los radios de afectación de la figura anterior.

Tabla 7.36. Distancias de afectación por radiación generada por la bola de fuego, dadas por el programa EFFECTS.

Código de color	Radiación (kW/m ²)	Distancia (m)
	35	50
	19.5	97
	9.8	155

Sobrepresión por explosión tipo BLEVE

Considerando una masa inflamable de Gas L.P. con un valor de 2,506 kg, los resultados de afectación por sobrepresión indican que el estallido repentino del tanque generaría una sobrepresión de 83 kPa hasta 33 m de la fuente, donde se tendría una destrucción total representada con color tinto en la figura 7.64. El menor daño se indica

en la zona de color amarillo donde la presión es de 3.5 kPa y se tiene a 267 m de la fuente.

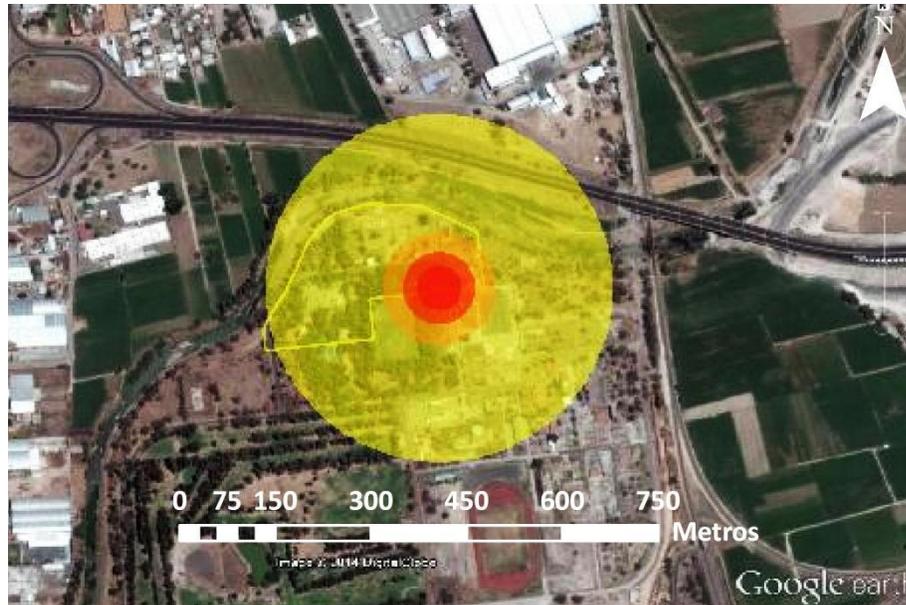


Figura 7.64. Radios de afectación por la sobrepresión generada en la explosión BLEVE utilizando el programa EFFECTS.

Las distancias de afectación por sobrepresión para cada nivel de daño se muestran en la siguiente tabla, cuyos valores se relacionan con los radios de afectación plasmados en la figura 7.64.

Tabla 7.37. Distancias de afectación por sobrepresión dadas por el programa EFFECTS.

Código de color	Sobrepresión (kPa)	Distancia (m)
	83	33
	35	54
	17	86
	3.5	267

Llamarada con Gasolina

El escenario accidental de llamarada con Gasolina fue determinado bajo el supuesto de un derrame total de la sustancia contenida en el tanque de mayor capacidad, como se mencionó en el apartado 7.6.4. Dicha sustancia comenzará a emitir vapores después de un cierto tiempo debido a sus propiedades que le confieren cierta volatilidad, los vapores generados se dispersarán bajo una atmósfera muy estable, lo cual provocará que éstos se concentren en un área y al encontrar un aporte de energía generará la deflagración instantánea del material inflamable. Los efectos de radiación por este tipo de escenarios no han sido muy estudiados a nivel científico por la espontaneidad del suceso implicado, por lo que para representar el área inflamable se utiliza el límite inferior de inflamabilidad de la sustancia.

En este caso, la simulación realizada con el programa EFFECTS no generó una imagen de isoconcentración pues la concentración máxima encontrada fue inferior a las 14,000 ppm que representan el límite inferior de inflamabilidad de la Gasolina. A continuación se presenta la gráfica de concentración contra distancia (figura 7.65).

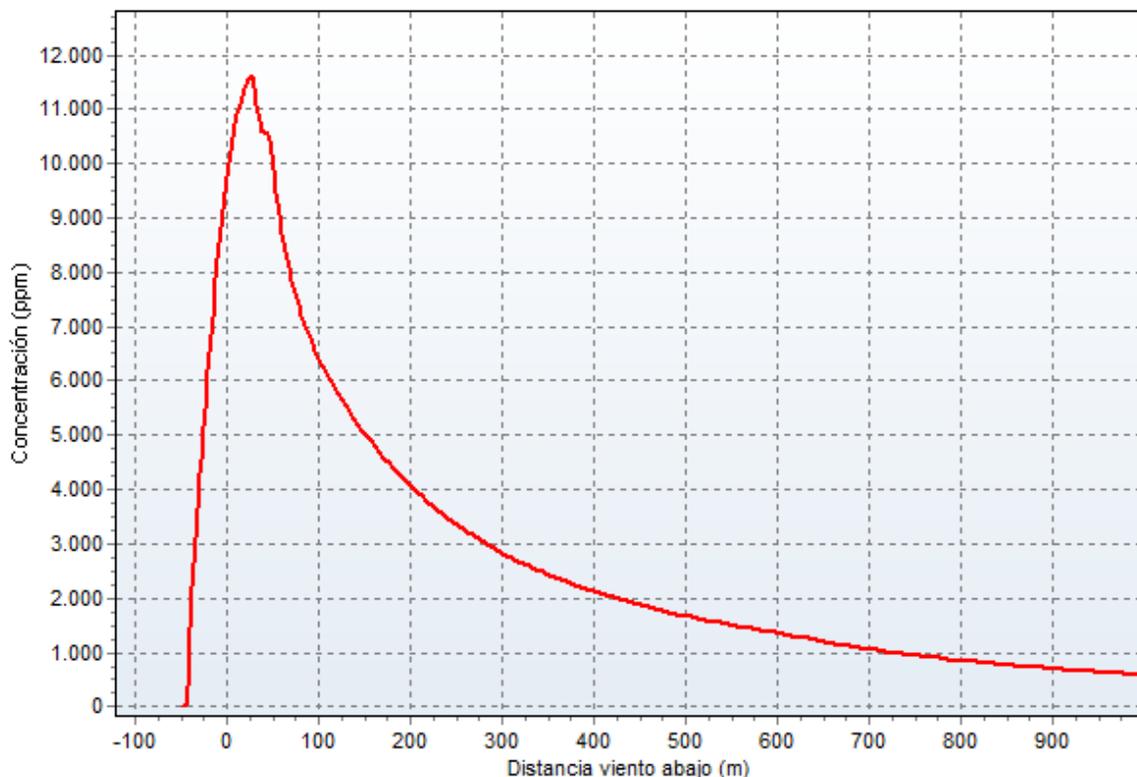


Figura 7.65. Concentración contra distancia viento abajo de la dispersión de vapores de gasolina como consecuencia de la evaporación del charco utilizando el programa EFFECTS.

Analizando la figura anterior se tiene que la concentración máxima es de menos de 12,000 ppm a una distancia de cerca de 30 m.

Incendio de charco

La deflagración del volumen de gasolina derramado en el dique cuyo efecto fue analizado con el programa EFFECTS, genera resultados que confirman que los efectos del mismo tienden a ser localizados. La altura de flama generada asciende a 22 m y los radios de afectación por radiación se encuentran en la figura 7.66.



Figura 7.66. Radios de afectación por radiación generada en el incendio de charco, utilizando el programa EFFECTS.

Los efectos por radiación tienen una distancia máxima de 26 m (ver tabla 7.38), donde el nivel de radiación es de 9.8 kW/m² que representa la zona donde se tendría el 1% de letalidad.

Tabla 7.38. Distancias de afectación por radiación generada en el incendio de charco, dadas por el programa EFFECTS.

Código de color	Radiación (kW/m ²)	Distancia (m)
	35	9
	19.5	17
	9.8	26

7.9 Resumen del análisis de consecuencias

En la tabla 7.39 se muestran los resultados de distancias máximas de afectación para cada escenario con los diferentes programas de simulación de consecuencias utilizados en el estudio.

Tabla 7.39. Distancias máximas de afectación para cada escenario accidental, obtenidas con los programas SCRI, ALOHA y EFFECTS.

ESCENARIOS			Distancias máximas de afectación (m)		
			SCRI	ALOHA	EFFECTS
Llamarada con Gas L.P.			52	103	55
Llamarada con Gasolina			123	0	0
Bola de fuego (Niveles de radiación en kW/m ²)	LC ₉₉	35	96	103	50
	LC ₅₀	19.5	123	142	97
	LC ₁	9.8	164	203	155
Sobrepresión por explosión BLEVE (Niveles de sobrepresión en kPa)	Destrucción total	> 83	32	<163	33
	Grave	35-83	51	163	54
	Moderado	17-35	82	175	86
	Menor	17-3.5	275	347	267
Nube explosiva (Niveles de sobrepresión en kPa)	Destrucción total	> 83	12	<62	12
	Grave	35-83	19	62	20
	Moderado	17-35	30	68	32
	Menor	17-3.5	101	139	99
Incendio de charco (Niveles de radiación en kW/m ²)	LC ₉₉	35	23	19	9
	LC ₅₀	19.5	33	29	17
	LC ₁	9.8	48	44	26

Analizando los resultados plasmados en la en la tabla anterior, se observa que las distancias de afectación obtenidas con los programas SCRI y EFFECTS son parecidos entre sí para la mayoría de los escenarios.

Por otro lado, el programa ALOHA reporta distancias de afectación mayor para los escenarios de llamarada con Gas L.P., bola de fuego y nube explosiva. Esto puede

deberse a que se trabajó en condiciones de velocidad del viento baja y condición atmosférica muy estable, para lo cual el programa ALOHA no presenta resultados confiables (EPA, 1998).

Sobre la confiabilidad de los modelos utilizados por los programas de simulación de consecuencias, es importante mencionar el tipo de modelo que utiliza cada software. En este caso, SCRI y EFFECTS utilizan el modelo para emisiones más densas que el aire SLAB, para el cual se puede observar en las figuras 7.67 y 7.68, que tanto para emisiones continuas como instantáneas, este modelo se encuentra dentro del nivel de confianza. El modelo utilizado por ALOHA es el DEGADIS (Dense Gas Dispersion), el cual se encuentra dentro del intervalo de confianza para los dos tipos de emisiones, sin embargo para emisiones instantáneas presenta mayor variabilidad en comparación con emisiones continuas.

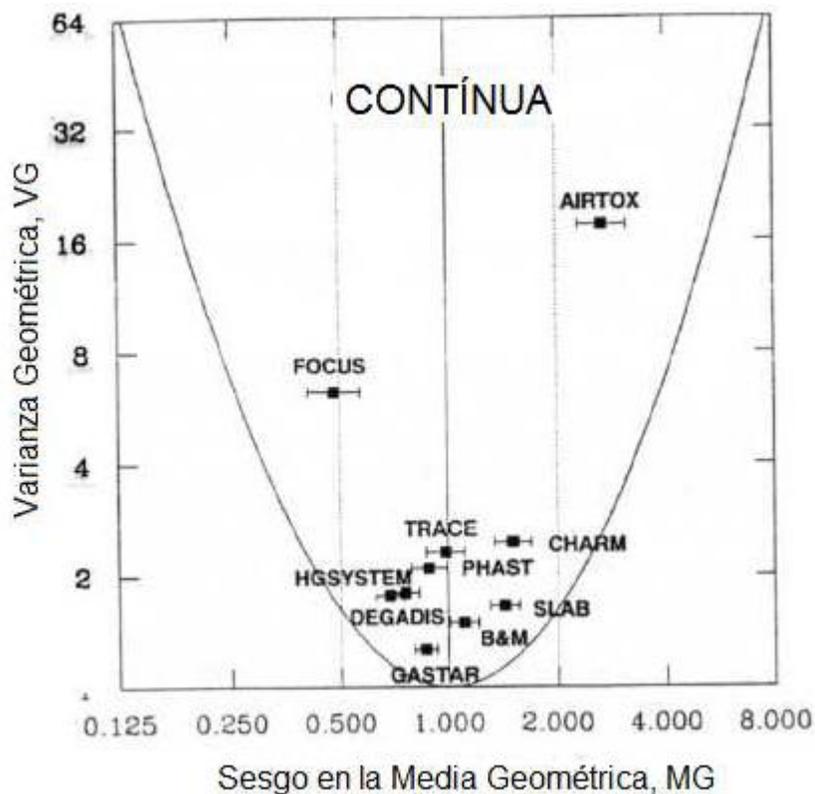


Figura 7.67. Resultados de confiabilidad de diversos modelos de simulación para emisiones continuas (Ortega, 2009).

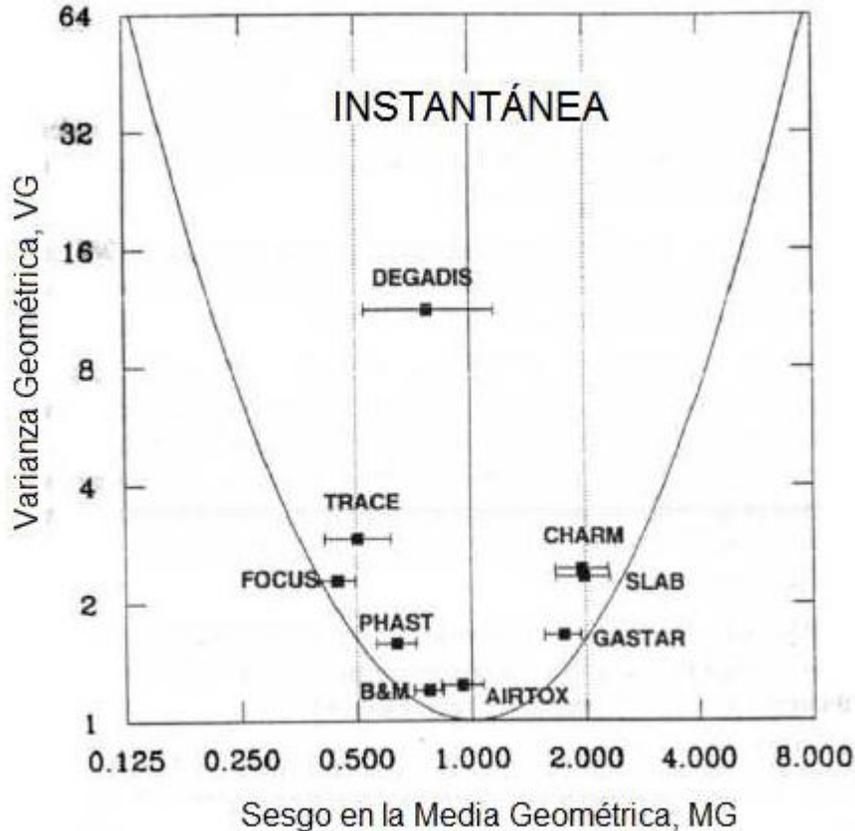


Figura 7.68. Resultados de confiabilidad de diversos modelos de simulación para emisiones instantáneas (Ortega, 2009).

Por lo anterior, se puede concluir que las distancias de afectación generadas por el programa SCRI son confiables y han sido comparadas con los resultados del programa EFFECTS, por lo que se ha optado por utilizar los resultados del SCRI para el cálculo del riesgo total de la instalación, pues los valores reportados son ligeramente más conservadores en la mayoría de los escenarios que los reportados por el EFFECTS.

7.10 Riesgo total de la instalación

El establecer el nivel de riesgo de una instalación es de gran importancia pues con ello se tiene información para trabajar en la disminución de riesgos de aquellas operaciones que puedan salirse de control, sin descuidar las operaciones que hacen que los escenarios de más bajo riesgo sigan operando en condiciones seguras.

Para estimar el riesgo total de la instalación es necesario conocer las distancias máximas de afectación de cada escenario accidental, así como la frecuencia del

mismo. El riesgo total será calculado en el programa Risk Curves, el cual es un software de análisis de riesgo cuantitativo.

Antes de calcular el riesgo total al que está expuesta la instalación es necesario tomar en cuenta la cercanía de los tanques de almacenamiento, pues los escenarios accidentales procedentes de cada suceso iniciador pueden generar el llamado efecto dominó.

Para que ocurra un efecto dominó por radiación se considera que tanto un tanque atmosférico como uno presurizado deben estar expuestos a más de **8 kW/m²**, por escenarios accidentales como bola de fuego e incendio de charco. Cuando el escenario accidental genera una sobrepresión y se encuentre un tanque aledaño, el valor de sobrepresión para generar un efecto dominó es mayor a **160 mbar** (16 kPa), para ambos tipos de almacenamiento. Dichos valores son utilizados en España y están definidos en el Real Decreto 1196/2003 para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas.

En el área de almacenamiento de combustibles del sitio de estudio, la separación entre el tanque de Gas L.P. y el dique donde se encuentran los tanques de Gasolina y Diésel, es de aproximadamente 13 m. Al producirse un incendio de charco la radiación a distancia a la que está expuesta el tanque presurizado es de 19.5 kW/m², por lo que es probable la afectación del mismo.

Por otro lado, las distancias entre los tanques que se encuentran dentro del dique son mínimas por lo que al presentarse un incendio de charco en el mismo, por fuga de gasolina, la radiación por fuente directa a la que están expuestos los tanques es de 35 kW/m². Así mismo, la sobrepresión a la que están expuestos los tanques de Gasolina y Diésel generada por la explosión tipo BLEVE, es de 83 kPa.

Por lo anterior, se calculó la vulnerabilidad de los tanques ante las consecuencias de dichos escenarios, utilizando la expresión 7.8 que relaciona la probabilidad de afectación (P) y la constante Probit (Y) (Nomen, et al., 2014):

$$P = 0.5 \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Y-5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad \text{Donde} \quad \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (7.8)$$

Las ecuaciones Probit utilizadas para los diferentes tipos de exposición accidental mencionados anteriormente, se encuentran en la tabla 7.40.

Tabla 7.40. Ecuaciones Probit para el cálculo de vulnerabilidad.

Tipo de tanque	Tipo de exposición	Ecuación Probit
Atmosférico	Radiación por fuente directa	$\ln(ttf) = -1.13 \cdot \ln(I) - 2.67 \cdot 10^{-5} \cdot V + 9.9$ $Y = 12.54 - 1.847 \cdot \ln(ttf)$
	Sobrepresión	$Y = -18.96 + 2.44 \cdot \ln(P_s)$
Presurizado	Radiación por fuente a distancia	$\ln(ttf) = -0.95 \cdot \ln(I) + 8.845 \cdot V^{0.032}$ $Y = 12.54 - 1.847 \cdot \ln(ttf)$

Fuente: Las ecuaciones Probit para los diferentes tipos de exposición fueron dadas por Nomen, et al. (2014). ttf: Tiempo en el que falla el tanque (s); V: Volumen del tanque (m³); I: Radiación (kW/m²); Ps: Sobrepresión máxima (Pa).

Se determinó que la probabilidad de afectación por radiación directa generada en el incendio de charco es de 0.99 para cada tanque de almacenamiento dentro del dique. La probabilidad de afectación de dichos tanques por la sobrepresión generada en la explosión tipo BLEVE fue de 0.5. Por otro lado, la probabilidad de afectación del tanque Gas L.P. por radiación generada en el incendio de charco es de 0.5.

Adicionalmente se calculó el tiempo de falla de los tanques y se encontró que para los tanques dentro del dique expuestos a una radiación de 35 kW/m², el tiempo de falla es de aproximadamente 6 min. Por otro lado, el tanque de Gas L.P., expuesto a una radiación por fuente a distancia, de 19.5 kW/m² fallaría en un tiempo de 11 min.

Las probabilidades de afectación a los tanques se utilizaron para el cálculo de frecuencias de un evento secundario, modificando así la frecuencia de los escenarios accidentales iniciales. Las expresiones utilizadas se muestran a continuación (ecuaciones 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, 7.18, 7.19, 7.20, 7.21, 7.22).

Frecuencia de Incendio de charco en el T₁ dado un efecto dominó

$$\begin{aligned}
 f_{Pool\ Fire\ T_1 | ED} = & \left[f_{Fuga\ T_1} + f_{Pool\ Fire\ T_2} P_{AT1|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T_3} P_{AT1|RT3} + f_{Pool\ Fire\ T_4} P_{AT1|RT4} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T_5} P_{AT1|RT5} + f_{Pool\ Fire\ T_6} P_{AT1|RT6} + f_{BLEVE\ T_7} P_{AT1|ST7} \right] P_5 \\
 & + \left[f_{Fuga\ T_1} + f_{Pool\ Fire\ T_2} P_{AT1|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T_3} P_{AT1|RT3} + f_{Pool\ Fire\ T_4} P_{AT1|RT4} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T_5} P_{AT1|RT5} + f_{Pool\ Fire\ T_6} P_{AT1|RT6} + f_{BLEVE\ T_7} P_{AT1|ST7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4
 \end{aligned}
 \tag{7.9}$$

Donde:

- $P_{AT1|RT2}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-526), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Diesel (R-524). Valor: 0.5
- $P_{AT1|RT3}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-526), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-140). Valor: 0.5
- $P_{AT1|RT4}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-526), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-619). Valor: 0.5
- $P_{AT1|RT5}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-526), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611). Valor: 0.5
- $P_{AT1|RT6}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-526), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610). Valor: 0.5
- $P_{AT1|ST7}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-526), por sobrepresión proveniente del tanque de Gas L.P. (R-612). Valor: 0.99

Frecuencia de incendio de charco en el T₂ dado un efecto dominó

$$\begin{aligned}
 f_{Pool\ Fire\ T_2\ |ED} = & \left[f_{Fuga\ T_2} + f_{Pool\ Fire\ T_1} P_{AT2|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T_3} P_{AT2|RT3} + f_{Pool\ Fire\ T_4} P_{AT2|RT4} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T_5} P_{AT2|RT5} + f_{Pool\ Fire\ T_6} P_{AT2|RT6} + f_{BLEVE\ T_7} P_{AT2|ST7} \right] P_5 \\
 & + \left[f_{Fuga\ T_2} + f_{Pool\ Fire\ T_1} P_{AT2|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T_3} P_{AT2|RT3} + f_{Pool\ Fire\ T_4} P_{AT2|RT4} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T_5} P_{AT2|RT5} + f_{Pool\ Fire\ T_6} P_{AT2|RT6} + f_{BLEVE\ T_7} P_{AT2|ST7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4
 \end{aligned}
 \tag{7.10}$$

Donde:

- $P_{AT2|RT1}$ Probabilidad de afectación al tanque de Diesel (R-524), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-526). Valor: 0.5
- $P_{AT2|RT3}$ Probabilidad de afectación al tanque de Diesel (R-524), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-140). Valor: 0.5
- $P_{AT2|RT4}$ Probabilidad de afectación al tanque de Diesel (R-524), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-619). Valor: 0.5
- $P_{AT2|RT5}$ Probabilidad de afectación al tanque de Diesel (R-524), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611). Valor: 0.5
- $P_{AT2|RT6}$ Probabilidad de afectación al tanque de Diesel (R-524), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610). Valor: 0.5
- $P_{AT2|ST7}$ Probabilidad de afectación al tanque de Diesel (R-524), por sobrepresión proveniente del tanque de Gas L.P. (R-612). Valor: 0.99

Frecuencia de incendio de charco en el T₃ dado un efecto dominó

$$\begin{aligned}
 f_{Pool\ Fire\ T3\ |ED} = & \left[f_{Fuga\ T3} + f_{Pool\ Fire\ T1} P_{AT3|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T2} P_{AT3|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T4} P_{AT3|RT4} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T5} P_{AT3|RT5} + f_{Pool\ Fire\ T6} P_{AT3|RT6} + f_{BLEVE\ T7} P_{AT3|ST7} \right] P_5 \\
 & + \left[f_{Fuga\ T3} + f_{Pool\ Fire\ T1} P_{AT3|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T2} P_{AT3|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T4} P_{AT3|RT4} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T5} P_{AT3|RT5} + f_{Pool\ Fire\ T6} P_{AT3|RT6} + f_{BLEVE\ T7} P_{AT3|ST7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4
 \end{aligned}
 \tag{7.11}$$

Donde:

- $P_{AT3|RT1}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-140), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-526). Valor: 0.5
- $P_{AT3|RT2}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-140), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Diesel (R-524). Valor: 0.5
- $P_{AT3|RT4}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-140), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-619). Valor: 0.5
- $P_{AT3|RT5}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-140), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611). Valor: 0.5
- $P_{AT3|RT6}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-140), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610). Valor: 0.5
- $P_{AT3|ST7}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-140), por sobrepresión proveniente del tanque de Gas L.P. (R-612). Valor: 0.99

Frecuencia de incendio de charco en el T₄ dado un efecto dominó

$$\begin{aligned}
 f_{Pool\ Fire\ T_4\ |ED} = & \left[f_{Fuga\ T_4} + f_{Pool\ Fire\ T_1} P_{AT4|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T_2} P_{AT4|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T_3} P_{AT4|RT3} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T_5} P_{AT4|RT5} + f_{Pool\ Fire\ T_6} P_{AT4|RT6} + f_{BLEVE\ T_7} P_{AT4|ST7} \right] P_5 \\
 & + \left[f_{Fuga\ T_4} + f_{Pool\ Fire\ T_1} P_{AT4|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T_2} P_{AT4|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T_3} P_{AT4|RT3} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T_5} P_{AT4|RT5} + f_{Pool\ Fire\ T_6} P_{AT4|RT6} + f_{BLEVE\ T_7} P_{AT4|ST7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4
 \end{aligned}
 \tag{7.12}$$

Donde:

- $P_{AT4|RT1}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-619), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-526). Valor: 0.5
- $P_{AT4|RT2}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-619), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Diesel (R-524). Valor: 0.5
- $P_{AT4|RT3}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-619), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-140). Valor: 0.5
- $P_{AT4|RT5}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-619), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611). Valor: 0.5
- $P_{AT4|RT6}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-619), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610). Valor: 0.5
- $P_{AT4|ST7}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gasolina (R-619), por sobrepresión proveniente del tanque de Gas L.P. (R-612). Valor: 0.99

Frecuencia de incendio de charco en el T₅ dado un efecto dominó

$$\begin{aligned}
 f_{Pool\ Fire\ T5\ |ED} = & \left[f_{Fuga\ T5} + f_{Pool\ Fire\ T1} P_{AT5|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T2} P_{AT5|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T3} P_{AT5|RT3} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T4} P_{AT5|RT4} + f_{Pool\ Fire\ T6} P_{AT5|RT6} + f_{BLEVE\ T7} P_{AT5|ST7} \right] P_5 \\
 & + \left[f_{Fuga\ T5} + f_{Pool\ Fire\ T1} P_{AT5|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T2} P_{AT5|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T3} P_{AT5|RT3} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T4} P_{AT5|RT4} + f_{Pool\ Fire\ T6} P_{AT5|RT6} + f_{BLEVE\ T7} P_{AT5|ST7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4
 \end{aligned}
 \tag{7.13}$$

Donde

- $P_{AT5|RT1}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-526). Valor: 0.5
- $P_{AT5|RT2}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Diesel (R-524). Valor: 0.5
- $P_{AT5|RT3}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-140). Valor: 0.5
- $P_{AT5|RT4}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-619). Valor: 0.5
- $P_{AT5|RT6}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610). Valor: 0.5
- $P_{AT5|ST7}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611), por sobrepresión proveniente del tanque de Gas L.P. (R-612). Valor: 0.99

Frecuencia de incendio de charco en el T₆ dado un efecto dominó

$$\begin{aligned}
 f_{Pool\ Fire\ T6\ |ED} = & \left[f_{Fuga\ T6} + f_{Pool\ Fire\ T1} P_{AT6|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T2} P_{AT6|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T3} P_{AT6|RT3} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T4} P_{AT6|RT4} + f_{Pool\ Fire\ T5} P_{AT6|RT5} + f_{BLEVE\ T7} P_{AT6|ST7} \right] P_5 \\
 & + \left[f_{Fuga\ T6} + f_{Pool\ Fire\ T1} P_{AT6|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T2} P_{AT6|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T3} P_{AT6|RT3} \right. \\
 & \left. + f_{Pool\ Fire\ T4} P_{AT6|RT4} + f_{Pool\ Fire\ T5} P_{AT6|RT5} + f_{BLEVE\ T7} P_{AT6|ST7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4
 \end{aligned}
 \tag{7.14}$$

Donde

- $P_{AT6|RT1}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-526). Valor: 0.5
- $P_{AT6|RT2}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Diesel (R-524). Valor: 0.5
- $P_{AT6|RT3}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-140). Valor: 0.5
- $P_{AT6|RT4}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-619). Valor: 0.5
- $P_{AT6|RT5}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611). Valor: 0.5
- $P_{AT6|ST7}$ Probabilidad de afectación al tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610), por sobrepresión proveniente del tanque de Gas L.P. (R-612). Valor: 0.99

Frecuencia de llamada en el T₁ dado un efecto dominó

$$f_{Flash Fire}_{T_1|ED} = \left[f_{Fuga_{T_1}} + f_{Pool_{Fire T_2}} P_{AT_1|RT_2} + f_{Pool_{Fire T_3}} P_{AT_1|RT_3} + f_{Pool_{Fire T_4}} P_{AT_1|RT_4} + f_{Pool_{Fire T_5}} P_{AT_1|RT_5} + f_{Pool_{Fire T_6}} P_{AT_1|RT_6} + f_{BLEVE_{T_7}} P_{AT_1|ST_7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4 \quad (7.15)$$

Frecuencia de llamada en el T₂ dado un efecto dominó

$$f_{Flash Fire}_{T_2|ED} = \left[f_{Fuga_{T_2}} + f_{Pool_{Fire T_1}} P_{AT_2|RT_1} + f_{Pool_{Fire T_3}} P_{AT_2|RT_3} + f_{Pool_{Fire T_4}} P_{AT_2|RT_4} + f_{Pool_{Fire T_5}} P_{AT_2|RT_5} + f_{Pool_{Fire T_6}} P_{AT_2|RT_6} + f_{BLEVE_{T_7}} P_{AT_2|ST_7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4 \quad (7.16)$$

Frecuencia de llamada en el T₃ dado un efecto dominó

$$f_{Flash Fire}_{T_3|ED} = \left[f_{Fuga_{T_3}} + f_{Pool_{Fire T_1}} P_{AT_3|RT_1} + f_{Pool_{Fire T_2}} P_{AT_3|RT_2} + f_{Pool_{Fire T_4}} P_{AT_3|RT_4} + f_{Pool_{Fire T_5}} P_{AT_3|RT_5} + f_{Pool_{Fire T_6}} P_{AT_3|RT_6} + f_{BLEVE_{T_7}} P_{AT_3|ST_7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4 \quad (7.17)$$

Frecuencia de llamada en el T₄ dado un efecto dominó

$$f_{Flash Fire}_{T_4|ED} = \left[f_{Fuga_{T_4}} + f_{Pool_{Fire T_1}} P_{AT_4|RT_1} + f_{Pool_{Fire T_2}} P_{AT_4|RT_2} + f_{Pool_{Fire T_3}} P_{AT_4|RT_3} + f_{Pool_{Fire T_5}} P_{AT_4|RT_5} + f_{Pool_{Fire T_6}} P_{AT_4|RT_6} + f_{BLEVE_{T_7}} P_{AT_4|ST_7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4 \quad (7.18)$$

Frecuencia de llamada en el T₅ dado un efecto dominó

$$f_{Flash Fire}_{T_5|ED} = \left[f_{Fuga_{T_5}} + f_{Pool_{Fire T_1}} P_{AT_5|RT_1} + f_{Pool_{Fire T_2}} P_{AT_5|RT_2} + f_{Pool_{Fire T_3}} P_{AT_5|RT_3} + f_{Pool_{Fire T_4}} P_{AT_5|RT_4} + f_{Pool_{Fire T_6}} P_{AT_5|RT_6} + f_{BLEVE_{T_7}} P_{AT_5|ST_7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4 \quad (7.19)$$

Frecuencia de llamarada en el T₆ dado un efecto dominó

$$f_{Flash\ Fire\ T_6 | ED} = \left[f_{Fuga\ T_6} + f_{Pool\ Fire\ T_1} P_{AT6|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T_2} P_{AT6|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T_3} P_{AT6|RT3} + f_{Pool\ Fire\ T_4} P_{AT6|RT4} + f_{Pool\ Fire\ T_5} P_{AT6|RT5} + f_{BLEVE\ T_7} P_{AT6|ST7} \right] \bar{P}_5 P_3 \bar{P}_4 \quad (7.20)$$

Frecuencia de BLEVE en el T₇ dado un efecto dominó

$$f_{BLEVE\ T_7 | ED} = \left[f_{Fuga\ T_7} + f_{Pool\ Fire\ T_1} P_{AT7|RT1} + f_{Pool\ Fire\ T_2} P_{AT7|RT2} + f_{Pool\ Fire\ T_3} P_{AT7|RT3} + f_{Pool\ Fire\ T_4} P_{AT7|RT4} + f_{Pool\ Fire\ T_5} P_{AT7|RT5} + f_{Pool\ Fire\ T_6} P_{AT7|RT6} \right] P_1 P_2 \quad (7.21)$$

Donde

- $P_{AT7|RT1}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gas L.P. (R-612), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-526). Valor: 0.5
- $P_{AT7|RT2}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gas L.P. (R-612), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Diesel (R-524). Valor: 0.5
- $P_{AT7|RT3}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gas L.P. (R-612), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-140). Valor: 0.5
- $P_{AT7|RT4}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gas L.P. (R-612), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de Gasolina (R-619). Valor: 0.5
- $P_{AT7|RT5}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gas L.P. (R-612), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-611). Valor: 0.5
- $P_{AT7|RT6}$ Probabilidad de afectación al tanque de Gas L.P. (R-612), por radiación proveniente del incendio de charco provocado por la fuga en el tanque de mezcla Diesel-Gasolina (R-610). Valor: 0.5.

Frecuencia de llamarada en el T₇ dado un efecto dominó

$$f_{Flash Fire_{T7}|ED} = \left[f_{Fuga_{T7}} + f_{Pool Fire_{T1}} P_{AT7|RT1} + f_{Pool Fire_{T2}} P_{AT7|RT2} + f_{Pool Fire_{T3}} P_{AT7|RT3} + f_{Pool Fire_{T4}} P_{AT7|RT4} + f_{Pool Fire_{T5}} P_{AT7|RT5} + f_{Pool Fire_{T6}} P_{AT7|RT6} \right] \bar{P}_1 P_3 \bar{P}_4 \quad (7.22)$$

De las ecuaciones anteriores, la frecuencia de fuga en los tanques 1, 2, 3, 4, 5 y 6, corresponde a la frecuencia del suceso iniciador del árbol de sucesos para la fuga de Gasolina y Diesel del apartado 7.5.; las frecuencias de los escenarios de Incendio de charco y llamarada para los tanques 1, 2, 3, 4, 5 y 6, son los valores de frecuencias de las consecuencias iniciales de dicho árbol de sucesos. Por otro lado, la frecuencia de fuga del tanque 7, corresponde a la fuga del suceso iniciador del árbol de sucesos para la fuga de Gas L.P.; de igual manera, los valores de frecuencias de las consecuencias por BLEVE y llamarada para el tanque 7, son los valores de frecuencias de las consecuencias del mismo árbol de sucesos.

Los resultados para las frecuencias de los escenarios secundarios calculadas con las ecuaciones anteriores, se encuentran en la tabla 7.41.

Tabla 7.41. Frecuencias de los escenarios accidentales por efecto dominó.

Frecuencia de escenarios secundarios	Valor (año ⁻¹)
$f_{Pool Fire_{T1} ED}^*$	1.45x10 ⁻⁷
$f_{Flash Fire_{T1} ED}^*$	1.32x10 ⁻⁷
$f_{BLEVE_{T7} ED}$	1.83X10 ⁻⁷
$f_{Flash Fire_{T7} ED}$	1.83X10 ⁻⁷

*Las frecuencias para el incendio de charco y llamarada en los tanques 2, 3, 4, 5, 6; tienen el mismo valor.

Una vez que se obtuvieron tanto las frecuencias de los escenarios accidentales como la magnitud de sus consecuencias, se puede proceder al cálculo del riesgo total de la instalación. En este caso se utilizó el programa Risk Curves para obtener las líneas de

isoriesgo. El programa se basa en la expresión 2.6 del apartado 2.2. Se obtuvieron los contornos de riesgo individual que se muestran en la figura 7.69.

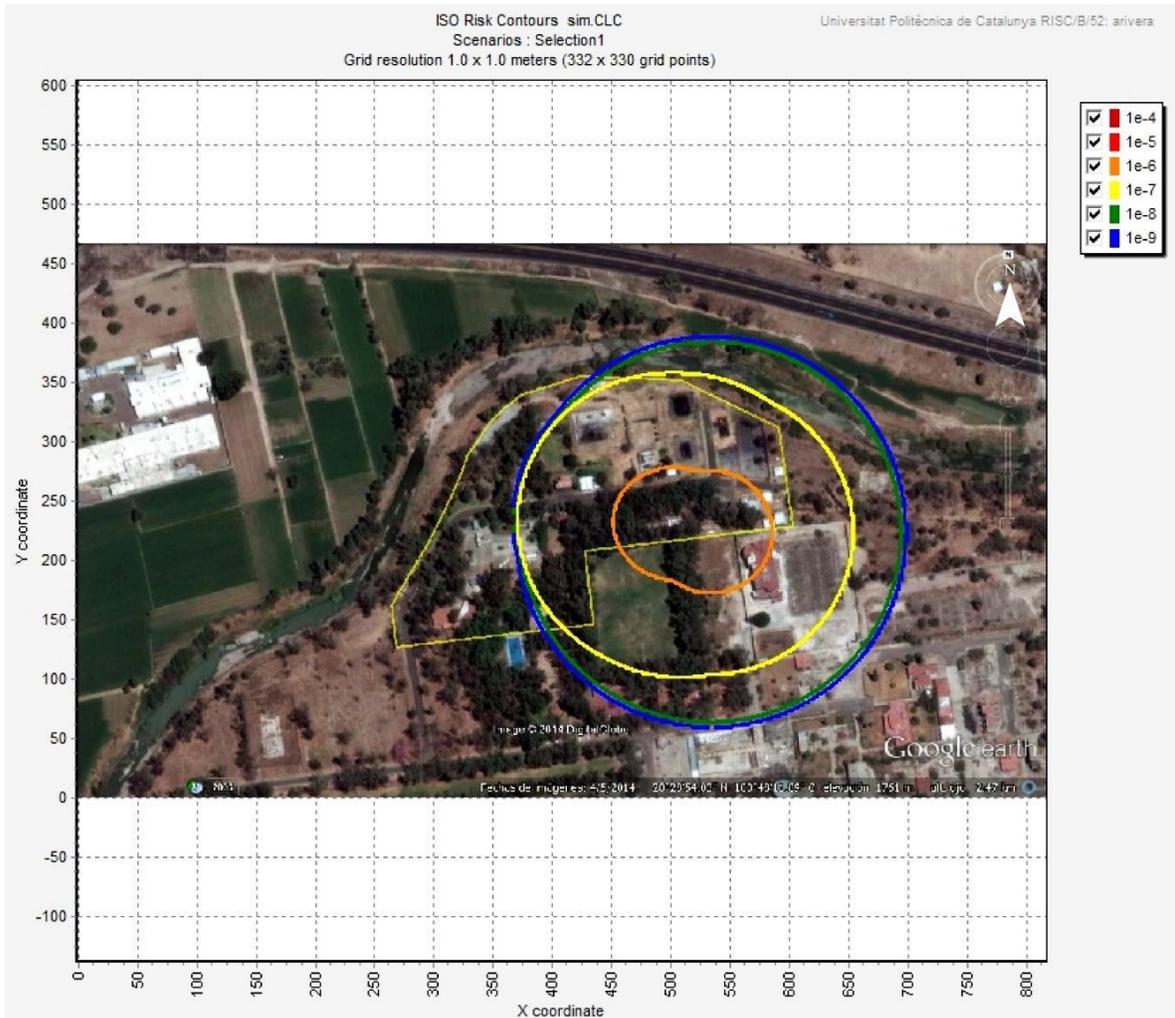


Figura 7.69. Contornos de riesgo total individual de la instalación.

Observando la figura anterior se tiene que la instalación tiene un nivel de riesgo máximo de 1×10^{-6} muertes/año (representado por el contorno anaranjado), que de acuerdo con los criterios de tolerancia del riesgo individual de la tabla 7.42, es un nivel de riesgo aceptable.

Tabla 7.42. Criterios de tolerancia de riesgo individual.

Frecuencias	Nivel de riesgo
$f > 1 \times 10^{-5} / \text{año}$	Inaceptable
$1 \times 10^{-6} > f \leq 1 \times 10^{-5}$	Reducción deseable: Aplicación de análisis costo-beneficio.
$f \leq 1 \times 10^{-6} / \text{año}$	Aceptable

Fuente: (Storch, et al., 2008).

7.11 Medidas de prevención

Las medidas de prevención son actividades enfocadas en el mejoramiento de los procesos y operaciones, con el fin de disminuir el nivel de riesgo. Las empresas que utilizan sustancias químicas deben trabajar en la identificación de los posibles riesgos para administrarlos correctamente y asegurar la salud del personal expuesto y de la población circundante, así como la seguridad del medio ambiente e instalaciones.

La seguridad física de las instalaciones que conforman el almacén de materiales peligrosos en el sitio y el procesamiento de las mismas debe ser el principal punto de atención para operar día tras día, de manera más segura. Es importante que los tanques de almacenamiento de Gasolina, Diesel y Gas L.P. estén en óptimas condiciones realizando el debido mantenimiento con regularidad y llevando a cabo pruebas de espesores que aseguren la resistencia mecánica de los mismos. Además, los accesorios como tuberías, válvulas, bombas, conexión a tierra, etc., deben ser inspeccionados para detectar averías y buscar una solución adecuada en el menor tiempo posible.

La verificación del buen funcionamiento de las instalaciones eléctricas en el sitio es de gran importancia, debido a que éstas pueden representar un punto de ignición.

De igual manera, es importante tener por escrito un programa donde se inventarían los equipos que están sujetos a inspección y al debido mantenimiento correctivo y preventivo, para cerciorar que los sistemas operarán en las condiciones para las que fueron diseñados.

Otro aspecto relevante es la capacitación del personal para operar los procesos con materiales peligrosos y su instrucción para el cierre de operaciones en caso de ser necesario, debido a que esto podría reducir el escape de dichas sustancias.

8 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Algunos de los escenarios de riesgo que se evaluaron en las secciones anteriores mostraron ciertas diferencias en la variación de los escenarios meteorológicos. Para evaluar las zonas de amortiguamiento que representan las zonas de seguridad en el sitio, se utilizaron los resultados de los escenarios de riesgo que mostraron mayores distancias de afectación, calculados con el programa SCRI. Para evaluar las zonas de amortiguamiento se tomaron los estándares de seguridad para radiación y sobrepresión del Proyecto de norma de referencia de PEMEX, NRF-018-PEMEX-2007, sobre estudios de riesgo.

Se realizó una simulación adicional para los escenarios de BLEVE e incendio de charco, esto con el fin de conocer las distancias a las que se encontraría una radiación de 1.4 kW/m^2 que significaría un nivel bajo para la zona de amortiguamiento.

Para el efecto de sobrepresión por la explosión BLEVE, la zona de amortiguamiento se encuentra a 275 m donde se presentaría una presión de 0.5 psi. Por otro lado, la zona de alto riesgo tendría una presión de 1 psi y se encontraría a 161 m de la fuente.

Los efectos críticos de radiación para la BLEVE resultaron en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima, en las diferentes estaciones del año. La zona de amortiguamiento es aquella donde se presentaría una radiación de 1.4 kW/m^2 a 381 m de la fuente y la zona de alto riesgo se encuentra a 220 m con una radiación de 5 kW/m^2 .

Por último, el incendio de charco resultó que sus efectos por radiación son ligeramente mayores en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima en las diferentes estaciones del año. La zona de amortiguamiento se encuentra a 133 m y la zona de alto riesgo a 71 m de distancia de la fuente.

En la tabla 8.1 se muestra un resumen de los efectos de los escenarios críticos evaluados, mostrando las distancias de zonas de amortiguamiento y de riesgo.

Tabla 8.1. Zonas de amortiguamiento para los escenarios críticos evaluados.

Escenario de riesgo	ZONAS DE SEGURIDAD			
	Efectos por radiación		Efectos por sobrepresión	
	Alto riesgo 5 kW/m^2 (m)	Amortiguamiento 1.4 kW/m^2 (m)	Alto riesgo 1 psi (m)	Amortiguamiento 0.5 psi (m)
Sobrepresión (BLEVE)	-	-	161	275
Radiación (BLEVE)	220	381	-	-
Incendio de charco	71	133	-	-

9 CONCLUSIONES

Inicialmente se seleccionó el sitio para la determinación de los radios de afectación por fugas de materiales peligrosos de acuerdo a la información proporcionada por la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ) y éste fue la Escuela de Capacitación de Brigadas de Emergencias (ECBE).

Así mismo, se conoció el funcionamiento de los programas SCRI, ALOHA y EFFECTS, encontrándose que se requiere de información meteorológica, propiedades físicoquímicas y energéticas, así como volúmenes e información de los equipos que contienen los materiales peligrosos; la cual es información necesaria para simular los diferentes escenarios por fuga, derrame, explosión e incendio.

Por otro lado, se determinaron los radios de afectación por fuga, explosión e incendio de materiales peligrosos en la ECBE hallándose que el peor escenario de llamarada de Gas L.P. por fuga desde el espacio del líquido es en condiciones de temperatura mínima y humedad relativa máxima en Invierno; para la explosión tipo BLEVE, los efectos por radiación afectarían a más de la mitad del predio.

Mientras que para los efectos de sobrepresión, que no se simula bajo condiciones meteorológicas, las ondas de choque afectarían a toda el área de la ECBE, y finalmente para el caso del incendio de charco el peligro de radiación está más localizado. Los escenarios que presentan efectos de radiación presentan mayores distancias de afectación en condiciones de temperatura máxima y humedad relativa mínima, sin embargo la variación entre escenarios no es significativa. Todos los escenarios por fuga, explosión e incendio en condiciones críticas salen de los límites del predio de la ECBE. Cabe mencionar que estos escenarios se presentarían solo si no existieran las condiciones de seguridad que tiene la ECBE.

Por otro lado, tomando en cuenta la frecuencia de cada escenario accidental y la magnitud de sus consecuencias, considerando el efecto dominó, el nivel de riesgo total individual de la planta es aceptable.

Las medidas de prevención adecuadas a los escenarios estudiados se proporcionaron considerando el mantenimiento de las instalaciones eléctricas, condiciones mecánicas de los tanques y el grado de capacitación del personal, dando con ello la recomendación de que continúen con las buenas prácticas de mantenimiento de los equipos y operación adecuada.

Por último, se plantearon escenarios de fugas, explosiones e incendio en el almacenamiento de materiales peligrosos mediante simulaciones computacionales, con los software SCRI, ALOHA y EFFECTS en la ECBE, los cuales permitieron determinar los escenarios de fuga, explosión e incendio, encontrando que el programa SCRI presenta resultados confiables, con el cual se pudieron determinar las zonas de riesgo y de amortiguamiento. Además se encontró que el uso de cualquier material peligroso conlleva a que las instalaciones tengan un cierto grado de riesgo y que identificándolo se pueden aplicar medidas para prevenir accidentes.

REFERENCIAS

Alderetes, O.C. y Bertollo, F. N. 2004. *Cálculo del tiempo de descarga de tanques y recipientes*. Argentina : Serie N°4, 2004.

BEVI. 2009. *Reference Manual version 3.2.* . s.l. : Bilthoven: RVIM, 2009.

Casal, J. 2008. *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*. Centre for Studies on Technological Risk, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España : Elsevier, 2008. ISBN: 978-0-444-5308-3.

Casal, J.; Montiel, H.; Planas, E.; Vílchez, J. 1999. *Análisis de riesgo en instalaciones industriales*. Barcelona : UPC, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.

Castillo, F. 2013. *CURSO Análisis de Riesgos Industriales en Plantas*. España : Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2013.

CENAPRED. 2001. *Modelación de radios de afectación por explosiones en instalaciones de gas*. México, D.F. : Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2001. ISBN: 970-628-603-9.

CENAPRED . 2003. *Identificación de peligros por almacenamiento de sustancias químicas en industrias de alto riesgo en México*. México, D.F. : s.n., 2003.

CENAPRED. 2006. *Guía práctica sobre riesgos químicos*. México, D.F. : s.n., 2006.

CENAPRED. 2007. *Riesgos Químicos*. México, D.F. : s.n., 2007. ISBN: 978-970-821-006-5.

CIQUIME. 2013. *BLEVE-Prevención y respuesta* . Buenos Aires, Argentina : Centro de Información Química para Emergencias , 2013.

CNEA. 2007. COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. [En línea] Julio de 2007. [Citado el: 22 de Septiembre de 2013.]
http://www.cnea.gov.ar/pdfs/revista_cnea/27/chernobil.pdf.

DGPC. 2002. *Guía Técnica: Zonas de planificación para accidentes graves de tipo técnico*. Madrid : Universidad de Murcia, 2002. Dirección General de Protección Civil.

Díaz, F. 2006. *Análisis de consecuencias y zonas de planificación para explosiones industriales accidentales (en el ámbito de las directivas Seveso)*. Murcia : Instituto nacional de seguridad e higiene en el trabajo, Universidad de Murcia, 2006. Tesis doctoral en ingeniería química.

Dinámica Heurística. 2007. SCRI-FUEGO. [En línea] 2007. [Citado el: 01 de Noviembre de 2013.] <http://www.dinamicaheuristica.com/scri/fuego.html>.

Dinámica Heurística . 2012. *Manual de modelos atmosféricos para simulación de contaminantes y riesgos en industrias.* México : Dinámica Heurística, S.A. de C.V., 2012. Versión 4.4.

Dinámica Heurística. 2013. *Taller de Modelos de Simulación y Análisis de Consecuencias.* México, D.F. : s.n., 2013.

DOF. 2011. *Norma Oficial Mexicana NOM-002-SCT-2011. Listado de las sustancias y materiales peligrosos más.* México, D.F. : Diario Oficial de la Federación, 2011.

DOF. 2009. *NORMA Oficial Mexicana NOM-010-SCT2/2009, Disposiciones de compatibilidad y segregación para el almacenamiento y transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos.* México, D.F. : Diario Oficial de la Federación, 2009.

Dunjóá, J., et al. 2009. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. USA : Elsevier, 2009. Vol. 173, 19–32.

ECBE. 2014. Escuela de Capacitación de Brigadas de Emergencia. [En línea] Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), 2014. [Citado el: 16 de Febrero de 2014.] www.ecbe.com.mx. Celaya, Guanajuato.

EPA. 2012. Acute Exposure Guideline Levels (AEGs). *Environmental Protection Agency.* [En línea] 2012. [Citado el: 12 de Noviembre de 2014.] <http://www.epa.gov/oppt/aegl/>.

EPA. 1998. *Area Locations Of Hazardous Atmospheres (ALOHA).* US : Environmental Protection Agency, 1998.

Ermak, D.L. 1990. *User's manual for SLAB: An atmospheric dispersion model for denser-than-air releases.* Livermore, California : Lawrence Livermore National Laboratory, 1990. UCRL-MA-105607.

Etowa, C.B., et al. 2002. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Quantification of inherent safety aspects of the Dow indices.* Canadá : Elsevier, 2002. Vol. 15 , 477–487.

Fullwood, R. R. y Hall, R. 2000. *Probabilistic risk assessment in the nuclear power industry : Fundamentals and applications.* USA : Butterworth-Heinemann, 2000.

Gobierno de Celaya. 2009. *Plan de ordenamiento territorial del municipio de Celaya, Gto.* s.l. : Ayuntamiento del municipio de Celaya, 2009.

González, R.C. 2011. *Análisis de los modelos matemáticos para la evaluación de consecuencias por derrames, fugas, explosiones e incendios provocados por desastres químicos.* México, D.F. : Universidad Nacional Autónoma de México, 2011. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Ambiental.

Gordillo, R. 2000. *Determinación de los riesgos operativos en la batería central de Sen, aplicando el método HAZOP.* México, D.F. : UNAM, 2000. Tesis para obtención del título Ingeniero Químico.

Gupta, J. P. 1997. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Application of Dow's fire and explosion index hazard classification guide to process plants in the developing countries.* India : Elsevier, 1997. Vol. 10, 1.

Hurdle, E.E. 2009. *Reliability Engineering and System Safety. Fault diagnostics of dynamic system operation using a fault tree based method.* [Artículo]. Inglaterra : Elsevier, 23 de Febrero de 2009. Vol. 94, 1371–1380, pág. 10.

INERCO. 2013. *Curso Análisis de Riesgos en Instalaciones Industriales.* Madrid : Ingeniería, Tecnología y Consultoría, S.A. (INERCO), 2013.

INSHT. 1984. *Métodos de extinción y agentes extintores.* *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.* [En línea] 1984. [Citado el: 5 de Mayo de 2014.] http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/001a100/ntp_099.pdf.

INSHT. 2007. *Fuga en recipientes: emisión en fase gaseosa y líquida.* *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT).* [En línea] 2007. [Citado el: 3 de Noviembre de 2013.] http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_385.pdf.

INSHT. 2013. *Análisis probabilístico de riesgos: Metodología del "Árbol de fallos y errores".* *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT).* [En línea] 2013. [Citado el: 12 de Octubre de 2013.] http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_333.pdf.

Koehler, F.H. 1984. *Draining Elliptical Vessel Heads.* s.l. : Chemical Engineering, 1984.

Kraus, S.R. 1998. *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Petróleo y gas natural.* Madrid, España : Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, Tomo 3, 1998. ISBN: 84-7434-995-8.

Lees, F.P. 2005. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control.* Gran Bretaña : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

Mantilla, A. 2006. *Análisis de riesgos y propuesta de seguridad e higiene industrial en el proceso productivo de la refinería Amazonas.* Quito, Ecuador : Universidad Tecnológica Equinoccial, Tesis de ingeniería industrial, 2006.

Masters, G.M. y Ela, W.P. 2008. *Introducción a la Ingeniería Medioambiental.* Madrid : Pearson, 2008. ISBN: 978-84-8322-444-1.

Méndez, J. 2013. Análisis de consecuencias . *Biblioteca Virtual en Salud y Desastres* . [En línea] 2013. [Citado el: 3 de Noviembre de 2013.] <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc15772/doc15772-c.pdf>.

Morales, G.M. 2014. *Encargado de Materiales, Servicios y Proyectos.* Celaya, Guanajuato : Escuela de Capacitación de Brigadas de Emergencia, 2014. Comunicación personal.

Nomen, R., Sempere, J. y Mariotti, V. 2014. QRA including domino effect as a tool for Engineering Design. Barcelona, España : ELSEVIER, 2014. Vol. 84, 23-32.

Ortega, C. 2009. *Diagnóstico de peligro por almacenamiento de materiales peligrosos en la zona industrial oriente de la ciudad de San Luis Potosí.* San Luis Potosí : Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2009. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales .

PCE. 2013. Protección Civil de España. *Metodologías de Análisis de Riesgos.* [En línea] 2013. [Citado el: 27 de Octubre de 2014.] http://www.proteccioncivil.org/metodos-cualitativos;jsessionid=7724F2A07ED52FBF2B2EEB106F294F3B.n1?p_p_id=122_INSTANCE_2myP&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=3&p_r_p_564233524_categoryId=521989.

Rausand, M. 2011. *Risk Assessment. Theory, methods, and application.* USA : Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-63764.

Rocha, M. G., 2014. Director general de 3RS Servicios de Consultoría Especializada EHS, S. de R.L. de C.V. Correo electrónico gchavez@3rs.com.mx. Comunicación personal.

Rodríguez, E.V. 2009. *Metodología para la planeación de análisis de riesgos en plantas de procesos.* México, D.F. : Instituto Politécnico Nacional, tesis de maestría , 2009.

Rubio, J. 2004. *Métodos de evaluación de riesgos laborales* . Madrid : Díaz de Santos, 2004. ISBN 978-84-7978-135-4.

Saá, L.J. 2009. *Análisis de riesgos para la planta de tratamiento de crudo de Ecuador TLC S.A.* Ecuador : Universidad San Francisco de Quito, 2009. Tesis de maestría.

SEGOB . 2010. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. *INAFED: Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal.* [En línea] Secretaría de Gobernación, 2010. [Citado el: 7 de Abril de 2014.] <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM11guanajuato/municipios/11007a.html>.

SENER. 2014. Refinación. *Secretaria de Energía (SENER).* [En línea] 2014. [Citado el: 19 de Abril de 2014.] http://www.energia.gob.mx/res/85/Refinacion_Web.pdf.

Stamatis, D.H. 2003. *Failure Mode Effect Analysis: FMEA from theory to execution .* USA : American Society for Quality, 2003.

Storch, J.M. ; García, M.T. 2008. *Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas: fundamentos, evaluación de riesgos y diseño.* España : Díaz de santos, S.A., 2008. 978-84-7978864-3.

TNO. 2012. *Effects user's manual.* Netherlands : TNO Built Environment & Geosciences, 2012. Version 8.

Vílchez, J., Espejo, V. ; Casal, J. 2011. *Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials.* Barcelona, España : Journal of Loss Prevention in the Process Industries. ELSEVIER, 2011. págs. 281-287. Vol. 24.

Zagal, J. 1996. Método de Evaluación de riesgos en accidentes químicos. *Memorias del simposio regional sobre preparativos para emergencias y desastres químicos: Un reto para el siglo XXI.* México, D.F. : PAHO,WHO, 1996.

ANEXOS

Lista de archivos ubicados en disco anexo.

1. Hoja de seguridad de materiales: Diesel.
2. Hoja de seguridad de materiales: Gasolina.
3. Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas: Gas Licuado de Petróleo.
4. Mapa de localización de peligros.
5. Reportes del programa SCRI.
6. Reportes del programa ALOHA.
7. Reportes del programa EFFECTS.
8. Reporte del programa Risk Curves.