

Proyecto Fin de Máster Ingeniería Ambiental

Modelización de Accidentes en una Planta de Almacenamiento y Regasificación de Gas Natural Licuado.

Autora: María de los Ángeles Gutiérrez Belmonte

Tutor: Carlos Leiva Fernández

**Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Ambiental

Modelización de Accidentes en una Planta de Almacenamiento y Regasificación de Gas Natural Licuado.

Autora:

María de los Ángeles Gutiérrez Belmonte

Tutor:

Carlos Leiva Fernández

Profesor titular

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Máster: Modelización de Accidentes en una Planta de Almacenamiento y Regasificación de Gas Natural Licuado.

Autora: María de los Ángeles Gutiérrez Belmonte

Tutor: Carlos Leiva Fernández

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi Profesor y Tutor Carlos Leiva Fernández por su paciencia y apoyo en cada decisión tomada.

A mi familia y amigos por todo el apoyo dado a lo largo de mi vida. En especial a mi pareja por apoyarme en todas mis decisiones y estar en cada momento a mi lado.

Gracias a todos de corazón.

María de los Ángeles Gutiérrez Belmonte

Sevilla, 2020

Resumen

El presente Trabajo Fin de Máster consiste en la modelización de diversos accidentes que pueden ocurrir en una industria química, concretamente en la Planta de Almacenamiento y Regasificación de Huelva, ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U.

A lo largo del documento se puede encontrar una descripción de la localización, tecnología, instalación además de un análisis de las sustancias peligrosas que almacena dicha planta, con el fin de justificar su afección al RD 840/2015 de accidentes graves.

El resultado de este análisis demuestra que la planta almacena una sustancia que se encuentra recogida dentro del Anexo 1, parte 2, en una cantidad superior a la establecida en el umbral de la columna 3.

Por todo ello, es necesario conocer los posibles accidentes que pueden ocurrir en la instalación, mediante modelizaciones. Dichas modelizaciones se van a desarrollar mediante el empleo de dos softwares: ALOHA y MARPLOT. El procedimiento para la realización de cada modelización se desarrolla de forma más detallada al final del documento.

En las modelizaciones a desarrollar, destacan tres tipos de accidentes que pueden tener lugar en la instalación:

- Nube tóxica sin inversión térmica y con inversión térmica.
- Jet Fire.
- Nube tóxica con efecto dominó.
- BLEVE.

Abstract

This Master's Thesis consists of the modeling of various accidents that may occur in a chemical industry, specifically in the Huelva Storage and Regasification Plant, ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U.

Throughout the document you can find a description of the location, technology, installation, as well as an analysis of the dangerous substances stored in said plant, in order to justify its involvement in the RD 840/2015 for major accidents.

The result of this analysis shows that the plant stores a substance that is listed within Annex 1, part 2, in an amount greater than that established in the threshold in column 3.

Therefore, it is necessary to know the possible accidents that can occur in the installation, through modeling. Said modeling will be developed using two software's: ALOHA and MARPLOT. The procedure for carrying out each modeling is developed in more detail at the end of the document.

In the modeling to be developed, three types of accidents that can take place in the facility stand out:

- Toxic cloud without thermal inversion and with thermal inversion.
- Jet Fire.
- Toxic cloud with domino effect.
- BLEVE.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xvi
Índice de tablas	xix
Índice de Ilustraciones	xx
1. Introducción	22
2. Objeto	23
3. Principales accidentes específicos en la industria química	24
3.1. <i>Accidentes de tipo térmico</i>	24
3.1.1. Incendio en charco (Pool Fire).	24
3.1.2. Bola de Fuego (Fireball)	25
3.1.3. Dardo de fuego (Jet Fire)	25
3.1.4. Incendio Flash (Flash Fire)	25
3.2. <i>Accidentes de tipo mecánico</i>	25
3.2.1. Explosiones iniciadoras de fugas	25
3.2.2. Explosiones como consecuencia de fugas	26
3.2.3. Explosiones como consecuencia de incendios	26
3.2.4. Explosiones como consecuencia de otras explosiones	26
3.3. <i>Accidentes de tipo químico</i>	26
3.3.1. Formación y evolución de nubes tóxicas	26
3.3.2. Parámetros implicados en las emisiones	27
4. Accidentes químicos históricos	29
5. Toxicología industrial	33
5.1. <i>Dosis-efecto y dosis-respuesta</i>	33
5.2. <i>Dosis: Límites, umbrales, etc</i>	33
5.2.1. Valores absolutos	33
5.2.2. Valores referidos a tiempos de exposición	34
5.2.3. Valores medios ponderados en el tiempo	35
6. Modelos de accidentes	36
6.1. <i>Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera</i>	36

6.2.	<i>Radiación térmica en incendios de líquidos y gases</i>	40
6.2.1.	Radiación térmica en un incendio	40
6.3.	<i>Explosiones de nubes de vapor no confinadas.</i>	45
6.3.1.	Modelo TNT de evaluación.	45
7.	Legislación aplicable a la seguridad industrial	47
7.1.	<i>Marco Legislativo</i>	47
7.2.	<i>Normativa Seveso</i>	51
7.3.	<i>Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas (Real Decreto 1196/2003)</i>	52
7.4.	<i>Norma ISO 13.702</i>	52
8.	Descripción de la Planta de Almacenamiento y Regasificación de Huelva, ENAGÁS Transporte, S.A.U.	54
8.1.	<i>Introducción</i>	54
8.2.	<i>Descripción de la ubicación</i>	54
8.2.1.	Geografía	54
8.2.2.	Demografía	55
8.2.3.	Geología	55
8.2.4.	Hidrología	56
8.2.5.	Paisaje	56
8.2.6.	Patrimonio histórico artístico y medio socioeconómico	56
8.2.7.	Vegetación y fauna terrestre	56
8.2.8.	Meteorología	56
8.3.	<i>Historia de la Planta de Almacenamiento y Regasificación de Huelva</i>	61
8.4.	<i>Información sobre el establecimiento</i>	61
8.4.1.	Identificación del establecimiento	61
8.5.	<i>Descripción del proceso</i>	61
8.5.1.	Recepción del gas natural	62
8.5.2.	Almacenamiento	62
8.5.3.	Regasificación	62
8.5.4.	Expedición	63
9.	Softwares empleados	64
9.1.	<i>ALOHA</i>	64
9.2.	<i>MARPLOT</i>	64
10.	Posibles accidentes	65
10.1.	<i>Características generales del compuesto originador del accidente</i>	65
10.2.	<i>Modelización de una nube tóxica.</i>	66
10.2.1.	Modelización de una nube tóxica: SW	66
10.2.2.	Modelización de una nube tóxica: NW	69
10.2.3.	Modelización de una nube tóxica: NNE	71
10.2.4.	Prevención y protección frente a una fuga de gas metano	73
10.3.	<i>Modelización de una nube tóxica con inversión térmica</i>	76
10.3.1.	Modelización de una nube tóxica con inversión térmica: NW	76
10.3.2.	Modelización de una nube tóxica con inversión térmica: NW	79

10.4.	<i>Modelización de un Jet Fire</i>	81
10.4.1.	Modelización de un Jet Fire: SW	81
10.4.2.	Modelización de un Jet Fire: NW	83
10.4.3.	Modelización de un Jet Fire: NNE	86
10.4.4.	Protección y prevención frente a un Jet Fire	88
10.5.	<i>Modelización de una nube tóxica con efecto dominó</i>	89
10.5.1.	Modelización de una nube tóxica con efecto dominó: SW	89
10.5.2.	Modelización de una nube tóxica con efecto dominó: NW	92
10.5.3.	Modelización de una nube tóxica con efecto dominó: NNE	94
10.5.4.	Protección y prevención frente a un accidente con efecto dominó	97
10.6.	<i>Modelización de una BLEVE</i>	97
10.6.1.	Modelización de una BLEVE: SW	98
10.6.2.	Modelización de una BLEVE: NW	100
10.6.3.	Modelización de una BLEVE: NNE	102
10.6.4.	Modelo TNT de evaluación.	105
11.	Conclusiones	107
	Bibliografía	108
	ÍNDICE DE CONCEPTOS	110
	Anexo I. Distancias entre la planta y las poblaciones y espacios naturales que la rodean	113
	ANEXO II: MANUAL ALOHA Y MARPLOT	116
1.	<i>Modelización de una nube tóxica</i>	116
2.	<i>Modelización de un Jet Fire</i>	123
3.	<i>Modelización de una nube tóxica con efecto dominó</i>	124
4.	<i>Modelización de una BLEVE.</i>	130

Índice de tablas

Tabla 3-1. Clasificación de tipos de incendios.	24
Tabla 5-1. Aplicación del índice LD50 para la calificación de riesgos tóxicos.	34
Tabla 6-1. Valor para cada tipo de fuga.	36
Tabla 6-2. Presión de vapor saturado del agua (Pa) en función de la temperatura (°C) [7].	41
Tabla 6-3. Intensidad media de radiación de la superficie de llama (kW/m ²) [7].	42
Tabla 6-4. Máxima radiación tolerable por personas y materiales [7].	43
Tabla 6-5. Porcentaje de personas afectadas según la Función Probit [7].	44
Tabla 7-1. Legislación laboral de aplicación general y de aplicación específica para la Industria Química.	48
Tabla 7-2. Legislación industrial de aplicación general y específica para la Industria Química.	49
Tabla 7-3. Legislación relativa a la Protección civil.	50
Tabla 8-1. Datos de poblaciones cercanas [10].	55
Tabla 8-2. Régimen termométrico durante el periodo de abril de 2019 hasta abril de 2020 [12].	56
Tabla 8-3. Régimen pluviométrico durante el periodo de abril de 2019 hasta abril de 2020. Fuente: [12].	57
Tabla 8-4. Porcentaje de pluviometría según la estación de año.	57
Tabla 8-5. Porcentaje de humedad media relativa a lo largo del año 2019.	58
Tabla 8-6. Tipo de estabilidades según Gifford.	60
Tabla 8-7. Datos de identificación del establecimiento [16].	61
Tabla 8-8. Enumeración y capacidad de los tanques [16].	62
Tabla 10-1. Propiedades físicas del metano [17].	65

Índice de Ilustraciones

Figura 4-1. Estado de la zona tras el accidente.	29
Figura 4-2. Rotura del dique de contención. Accidente de Aznarcóllar.	30
Figura 4-3. Incendio de los tanques de la Refinería de Repsol de Puertollano.	30
Figura 4-4. Incendio de un tanque de la Petroquímica IQOXE en Tarragona.	31
Figura 4-5. Explosión en el puerto de Beirut (2020) [6].	32
Figura 6-1. Representación gráfica de la evolución de una nube de gas proveniente de una fuente instantánea [6].	36
Figura 6-2. Coeficiente de dispersión para cualquier tipo de estabilidad atmosférica en la dirección del viento σ_x [6].	38
Figura 6-3. Coeficiente de dispersión lateral σ_y , según la distancia [6].	38
Figura 6-4. Coeficiente de dispersión vertical σ_z , según la distancia [6].	39
Figura 6-5. Coeficientes para el cálculo de σ_y (valores promedio en un intervalo de 10 minutos) y σ_z (altura de la fuente de emisión <20 m y una rugosidad del terreno $z_0 = 0,1$ m) según la categoría de estabilidad atmosférica [6].	39
Figura 6-6. Valores de la rugosidad z_0 para distintas zonas [6].	39
Figura 6-7. Forma cilíndrico vertical de un incendio [7].	41
Figura 6-8. Coeficiente de transmisión d en función de la distancia c [7].	42
Figura 6-9. Gráfico para el cálculo de la sobrepresión de una Bleve [8].	46
Figura 7-1. Panorama de la legislación industrial española [9].	48
Figura 7-1. Panorama de la legislación industrial española [10].	48
Figura 8-1. Emplazamiento de la instalación objeto de modelización.	55
Figura 8-2. Distribución de temperaturas y precipitaciones medias mensuales.	57
Figura 8-3. Velocidad promedio del viento durante el año 2019. Fuente: [13].	58
Figura 8-4. Rosa de Vientos. Fuente: [14].	59
Figura 8-5. Clases de estabildades según Pasquill.	60
Figura 8-6. Proceso de regasificación del gas natural licuado. Fuente: [16].	63
Figura 10-1. Representación gráfica de las zonas de planificación para una nube tóxica de metano.	67
Figura 10-2. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	68
Figura 10-3. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	68
Figura 10-4. Representación gráfica de las zonas de planificación para una nube tóxica de metano.	70
Figura 10-5. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	70
Figura 10-6. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	71
Figura 10-7. Representación gráfica de las zonas de planificación para una nube tóxica de metano.	72
Figura 10-8. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	73
Figura 10-9. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	73
Figura 10-10. Obstrucción provisional de fugas en fase gaseosa [20].	75
Figura 10-11. Representación gráfica de las zonas de planificación de una nube tóxica con inversión térmica.	77

Figura 10-12. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	78
Figura 10-13. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	78
Figura 10-14. Representación gráfica de las zonas de planificación de un Jet Fire con inversión térmica.	80
Figura 10-15. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	80
Figura 10-16. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	81
Figura 10-17. Representación gráfica de las zonas de planificación Jet Fire.	82
Figura 10-18. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	83
Figura 10-19. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	83
Figura 10-20. Representación gráfica de las zonas de planificación Jet Fire.	85
Figura 10-21. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	85
Figura 10-22. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	86
Figura 10-23. Representación gráfica de las zonas de planificación Jet Fire.	87
Figura 10-24. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	88
Figura 10-25. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	88
Figura 10-26. Representación gráfica de las zonas de planificación de una nube tóxica con efecto dominó.	90
Figura 10-27. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	91
Figura 10-28. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	91
Figura 10-29. Representación gráfica de las zonas de planificación de una nube tóxica con efecto dominó.	93
Figura 10-30. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	93
Figura 10-31. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	94
Figura 10-32. Representación gráfica de las zonas de planificación de una nube tóxica con efecto dominó.	96
Figura 10-33. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	96
Figura 10-34. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	97
Figura 10-35. Representación gráfica de las zonas de planificación de una BLEVE.	99
Figura 10-36. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	99
Figura 10-37. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	100
Figura 10-38. Representación gráfica de las zonas de planificación de una BLEVE.	101
Figura 10-39. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	102
Figura 10-40. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	102
Figura 10-41. Representación gráfica de las zonas de planificación de una BLEVE.	104
Figura 10-42. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.	104
Figura 10-43. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.	105

1. INTRODUCCIÓN

Las industrias químicas se caracterizan por tener bajo riesgo de accidentes, es decir, tienen una Tasa de Accidentes Mortales de entre 1 y 4. Si se compara con otras actividades, este índice es muy bajo, ya que actividades como la construcción y la conducción en carretera presentan un índice de 5-64 y 57-100, respectivamente [1].

Para que este índice se mantenga tan bajo en este tipo de industria, es de vital importancia que se tengan en cuenta todos los aspectos de seguridad posibles. Siendo, por tanto, objeto de una intensa atención a la hora de realizar el diseño, proyecto, operación, mantenimiento de la planta y su posterior desmantelamiento.

La secuencia accidental, que se desarrollará con detalle más adelante y que se puede dar, de manera incompleta o total, suele ser:

- Accidentes de tipo térmico: combustión de los fluidos contenidos o emitidos, generando radiación térmica.
- Accidentes de tipo mecánico: suelen producirse como consecuencia de una explosión.
- Accidentes de tipo químico: derrame (líquidos) o escape (gases y vapores) generalmente por pérdida de contención de los fluidos, pudiendo generar efectos tóxicos.

Estos accidentes pueden afectar a las personas, a los bienes y al medio ambiente tanto dentro como fuera de los límites de la planta en la cual tienen origen.

2. OBJETO

El presente proyecto tiene por objeto la modelización de diversos accidentes que pueden ocurrir en una industria química. Para ello se ha tomado como referencia una planta de almacenamiento y regasificación de gas natural licuado en Huelva, más concretamente la planta de Enagás Transporte, S.A.U.

Para llevar a cabo las modelizaciones se va a emplear los softwares ALOHA Y MARPLOT. Estos softwares permiten que, a través de unos datos recabados de bibliografía, se puedan simular diversos accidentes. Entre ellos destacan:

- Modelización de una nube tóxica sin inversión térmica y con inversión térmica.
- Modelización de un Jet Fire.
- Modelización de una nube tóxica con efecto dominó.
- Modelización de una BLEVE.

Previamente a las modelizaciones de los distintos accidentes, se va a detallar tanto las características de la planta como las de su zona de emplazamiento. También se detallarán las variables que entran en juego en cada una de las modelizaciones.

3. PRINCIPALES ACCIDENTES ESPECÍFICOS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA

La Directiva 2012/18/UE, de 4 de julio (Seveso III), define como accidente grave: “*un hecho, como una emisión, un incendio o una explosión importante, que resulte de un proceso no controlado durante el funcionamiento de cualquier establecimiento al que se aplique la presente Directiva, que suponga un peligro grave, ya sea inmediato o diferido, para la salud humana o el medio ambiente, dentro o fuera del establecimiento, y en el que intervengan una o varias sustancias peligrosas.*”.

Tras esta directiva surge la importancia de conocer los accidentes típicos de la industria química, distinguiéndose accidentes de tipos térmico, mecánico y químico.

3.1. Accidentes de tipo térmico

La magnitud más peligrosa de este tipo de accidentes es la radiación térmica provocada por los incendios. Además, debe destacarse la posibilidad de que se generen sustancias tóxicas, ondas de presión o formación de proyectiles, que suele ser otros de los incidentes con mayor magnitud.

Los incendios son reacciones de oxidación de materias combustibles que se pueden clasificar en cuatro tipos distintos que depende del estado físico en el que se encuentre el producto que los origina. En la siguiente tabla se muestran dichos accidentes, así como sus características [2]:

Tabla 3-1. Clasificación de tipos de incendios.

TIPOS DE INCENDIOS		
Denominación	Estado físico del producto	Ignición
Incendio en charco o depósito	Líquido	Inmediata o diferida
Bola de fuego	Gas o líquido	Inmediata
Dardo de fuego	Gas o líquido	Inmediata o diferida
Incendio flash	Gas	Diferida

A continuación, se van a desarrollar los accidentes que se van a simular posteriormente.

3.1.1. Incendio en charco (Pool Fire).

El incendio es provocado como consecuencia de una condición no presurizada, es decir, este ocurre en condiciones abiertas. En este caso el líquido es derramado en un área más o menos extensa o puede encontrarse en un recipiente abierto o a presión atmosférica.

Las principales manifestaciones de este tipo de incendio son fundamentalmente: la emisión de calor radiante y humos.

3.1.2. Bola de Fuego (Fireball)

En este caso se produce una inflamación inmediata de la nube de gases o de vapores formada como consecuencia de una fuga en un espacio abierto. Los efectos que produce son:

- a) Radiación térmica y de corta duración originada en una llama voluminosa.
- b) Evolución hacia la forma de hongo por la ascensión de gases muy calientes y más ligeros.
- c) Sobrepresión.

Este tipo de accidente puede derivar en una BLEVE.

3.1.3. Dardo de fuego (Jet Fire)

Se produce cuando se origina una fuga localizada de gases o vapores a presión. Estos se incendian al entrar en contacto con un punto de ignición dando lugar a un fuego semejante al de un dardo de un soplete. Este tipo de incendio tiene el inconveniente de que si se produce cerca de otros equipos puede derivar en un accidente de mayor relevancia.

3.1.4. Incendio Flash (Flash Fire)

Consiste en la combustión de nubes de vapor o gas no confinadas que se caracteriza por la rapidez del frente de llama. Si la ignición no tiene lugar en el momento inmediato al inicio del escape, existe la posibilidad de que se forme una nube de vapor inflamables.

El frente de llama avanza de forma rápida originando una onda de presión denominada “explosión de nube de vapor no confinada”.

3.2. Accidentes de tipo mecánico

En este tipo de accidentes destacan las explosiones, que son fenómenos caracterizados por el desarrollo de una presión o sobrepresión que provocan daños mecánicos.

Dependiendo del origen y de la naturaleza de las explosiones estas pueden estar tanto en el inicio de la fuga (con consecuencias tóxicas y posibilidad de desencadenar un incendio) o deberse a la evolución de una combustión autoacelerada hacia la detonación.

Las explosiones pueden clasificarse como: explosiones iniciadoras de fugas, explosiones como consecuencia de fugas, explosiones como consecuencia de incendios y explosiones como consecuencia de otras explosiones [2].

3.2.1. Explosiones iniciadoras de fugas

Este tipo de explosiones pueden ocurrir por dos causas:

- a) Por exceso de presión.

Este tipo de explosión ocurre cuando se sobrepasa la presión correspondiente a la resistencia mecánica de los sistemas conectores determinándose así el fallo de confinamiento o contención que provoca la fuga del fluido contenida. Esta sobrepresión puede ocurrir por las siguientes causas:

- Características del proceso: fallos en la conexión de los equipos, golpes de ariete, etc.
 - Reacciones o descomposiciones exotérmicas descontroladas.
 - Por dilatación de una fase líquida única.
- b) Por debilitamiento de materiales debido al calor, frío o corrosión.

3.2.2. Explosiones como consecuencia de fugas

Este tipo de explosiones las podemos clasificar en:

- 1) Ignición diferida de gases y vapores confinados (UVCE¹).

En este caso la UVCE puede producirse cuando la nube de vapor o gas fugado es inflamable o cuando la ignición de la nube se produce un tiempo después de la fuga.

Parte de la energía provocada por la explosión es manifestada en forma mecánica la cual lleva asociado un fuego. En este tipo de explosiones, si tiene lugar la ignición de la nube tras un tiempo después de la fuga, se puede producir una BLEVE.

- 2) Ignición diferida de polvos y nieblas no confinados.

Al ser una ignición con polvo suspendido sus efectos dependerán de la carga energética por unidad de volumen, que es mayor para polvos y nieblas que para gases y vapores, y los polvos presentan una menor capacidad de difusión en el espacio si es comparado con los gases, las nieblas o los vapores.

3.2.3. Explosiones como consecuencia de incendios

El calor que se origina en un incendio puede dar lugar a explosiones debido a que el incendio ocurra en sistemas cerrados o en sistemas semiabiertos.

3.2.4. Explosiones como consecuencia de otras explosiones

Como consecuencia de una explosión, estas pueden originar incendios u otras explosiones.

Por un lado, la onda explosiva puede deformar e incluso destruir equipos adyacentes (recipientes, tanques, tuberías, bombas, etc.) a lo largo de su paso. Por otro lado, los proyectiles que se originan durante una explosión pueden provocar efectos similares.

3.3. Accidentes de tipo químico

Los accidentes de tipo químico están constituidos por la emisión o formación de nubes tóxicas, que están considerados como los accidentes de mayor peligrosidad y de mayor complejidad en cuanto a su modelización. Esta peligrosidad viene determinada por el nivel de toxicidad de las sustancias involucradas y por su persistencia en el medio además de su alcance [2].

A continuación, se van a exponer los aspectos y características más relevantes de este tipo de accidentes. Es preciso mencionar que únicamente se hace referencia a las nubes formadas por sustancias puras en estado líquido o gaseoso.

3.3.1. Formación y evolución de nubes tóxicas

En los accidentes industriales las nubes que mayor probabilidad de formación tienen son las de densidades mayores a las del aire circundante. Su formación y evolución la podemos clasificar en cuatro etapas:

- 1) Emisión. Está relacionada con las características del medio en el cual la sustancia se encuentra contenida, por sus características termodinámicas, por las condiciones de presión y temperatura del almacenamiento y la posición de la rotura, así como sus

¹ UVCE: Unconfined vapor cloud explosión

dimensiones. Dependiendo de dichas características la fuga puede producirse en fase monofásica o bifásica.

- 2) Abatimiento sobre el suelo. Este es producido como consecuencia de una mayor densidad de la nube con respecto a la del aire.
- 3) Extensión y avance por gravedad. La nube se extiende y discurre adaptándose a la morfología del terreno y ocupando las zonas más bajas.
- 4) Dispersión pasiva. A medida que se produce una mayor entrada de aire en el frente la densidad de la mezcla comienza a disminuir, hasta que se alcanza la dispersión pasiva.

3.3.2. Parámetros implicados en las emisiones

En cuanto a los parámetros más relevantes de este tipo de accidentes podemos destacar:

- a) Almacenamiento.

Los contenedores en los que estos gases se encuentran almacenados suelen ser: depósitos, tuberías conectadas a depósitos y tuberías aisladas.

Las características geométricas de dichos depósitos son similares a las de una esfera o cilindro (vertical u horizontal). La altura es el parámetro de mayor relevancia en este tipo de accidentes, ya que a mayor altura de depósito mayor es la cantidad fugada. La presencia o no de aislamiento de los depósitos es otro factor a tener en cuenta en el caso de gases licuados.

En cuanto a las tuberías, el caudal de fuga depende de las condiciones de su almacenamiento, de la geometría de la tubería y del orificio y del coeficiente de descarga.

- b) Estado físico del gas o líquido.

Este parámetro es muy importante ya que dependiendo de las condiciones de presión y temperatura de almacenamiento este puede encontrarse en fase líquida, gaseosa o como gas licuado.

- c) Orificio de fuga.

El tamaño del orificio de la fuga establece la duración de la emisión. De tal forma que si el orificio es grande en relación al volumen del depósito la fuga será más rápida, considerándose como fuga instantánea. Si por el contrario el orificio es más pequeño la fuga es continua pudiéndose bloquear.

- d) Vertidos.

En caso de que la fuga sea de una sustancia líquida, el grado de contención de los alrededores condicionará la formación de charcos.

Otros factores muy relevantes a tener en cuenta en la evolución de una nube tóxica son las condiciones meteorológicas, entendiéndose como las más significativas las que se muestran a continuación:

- Temperatura y presión.
La temperatura ambiente influye en la cinética de las reacciones de las sustancias, pudiendo transformar las sustancias fugadas en el aire. La presión atmosférica a nivel del suelo está relacionada con la estabilidad.
- Humedad y pluviosidad.
La humedad da lugar a la formación de aerosoles líquidos cuando el producto fugado es higroscópico, además puede modificar la densidad de la nube aumentando la masa molar. En cuanto a la pluviosidad es de vital relevancia ya que influye en la eliminación de contaminantes atmosféricos.

- Magnitud, dirección y persistencia del viento.
La velocidad del viento afecta en la dispersión de la nube tóxica. La dirección condiciona el transporte de la sustancia fugada, mientras que la persistencia se refiere a la estabilidad de la dirección del viento.
- La radiación solar.
Es el fenómeno de mayor importancia que dinamiza los diversos movimientos que tienen lugar en la atmósfera.
- La turbulencia o clase de estabilidad atmosférica.
Influye de forma decisiva en la mezcla y dispersión vertical de las emisiones y depende de diversos parámetros comentados anteriormente.

4. ACCIDENTES QUÍMICOS HISTÓRICOS

En España, desde el siglo XX ha habido un total de noventa accidentes industriales, en los que en el 2% de los mismos hubo más de cien fallecidos, en el 6% hubo entre 10-100 muertos, en el 63% hubo hasta diez muertos, y en un 29% no hubo víctimas mortales [3].

A continuación, se muestran los accidentes con mayor relevancia que han tenido lugar en España en los últimos años:

- Accidente de los Alfaques, San Carlos de la Rápita (1978).

El 11 de julio de 1978, sobre las 14:00 horas, se produjo una explosión de un camión cisterna que contenía propileno procedente de la refinería de Tarragona en la carretera que bordea el camping de los Alfaques, situado en la localidad de San Calor de la Rápita (Tarragona).

El camión cisterna excedía de su capacidad máxima de 19,35 t ya que transportaba 25 t. Además, no disponía de ningún sistema de alivio de sobrepresión.

Tras la explosión se produjo una bola de fuego que alcanzó más de 2000 grados centígrados, lo que ocasionó la muerte de 158 personas de forma inmediata, 57 muertes al cabo de las horas y 70 personas con heridas graves [4].



Figura 4-1. Estado de la zona tras el accidente.

- Accidente del carguero Casón, Finisterre (1987).

El 5 de diciembre de 1987, frente a la playa Del Rosto de la costa de Finisterre, encalló el carguero Casón que transportaba miles de toneladas de productos químicos inflamables y corrosivos a bordo.

Debido a un fuerte temporal se produjo un desplazamiento de parte de la carga lo que provocó el origen de un incendio. Hubo 23 muertos y ocho supervivientes.

- Accidente de Aznalcóllar, Sevilla (1998).

El accidente tuvo lugar el 25 de abril de 1998 en las instalaciones de la empresa Boliden-Apirsa, que explotaba una mina en el pueblo de Aznalcóllar. Esta mina, producía concentrados de zinc, plata, plomo y cobre.

Durante su actividad, los residuos del proceso de extracción se vertían a un gran estanque artificial (balsa) que abarcaba una superficie aproximada de 1,5 km² y que contenía alrededor de treinta millones de toneladas de fangos. La balsa se encontraba rodeada por un dique de contención.

La noche del 24 al 25 de abril de 1998, el dique que aseguraba la balsa sufrió una rotura de unos 50 metros de longitud, por donde se vertieron alrededor de tres millones de metros cúbicos de fangos y cuatro millones de metros cúbicos de aguas ácidas. Se produjo la contaminación de unas 4.500 hectáreas del Parque Nacional “Coto de Doñana” y alcanzaron el río Guadimar.

Se estima que el coste de la descontaminación de la zona superó los 300 millones de euros. En la figura que se muestra a continuación se puede apreciar la rotura del dique de contención [5].



Figura 4-2. Rotura del dique de contención. Accidente de Aznarcóllar.

- Accidente de un camión cisterna, Tivissa (2002).

El accidente sucedió el 22 de junio de 2002 a las 14:45 horas. El conductor del camión se vio obligado a frenar bruscamente al llegar a una curva muy pronunciada lo que provocó la pérdida de control. El camión rompió una valla y volcó iniciándose un pequeño incendio en el camión.

El camión cisterna estuvo alrededor de 20 minutos incendiándose hasta que se produjo la explosión. La deflagración provocó la muerte del conductor y quemaduras a la gente que se encontraba alrededor.

- Accidente de Puertollano, Ciudad Real (2003).

El 14 de agosto de 2003, a las 8:15 horas de la mañana, se produjo una explosión en la refinería de Puertollano. Tras la explosión se produjo un incendio que se propagó a los tanques de alrededor, ardiendo un total de 7 tanques.



Figura 4-3. Incendio de los tanques de la Refinería de Repsol de Puertollano.

El accidente tuvo lugar como consecuencia de que en días previos se produjo una parada de la unidad de craqueo. Según el informe de la investigación, se originó una difusión de una de las columnas de destilación de la unidad de craqueo, la cual provocó una salida de gasolina con un contenido anormal de gases que se acumularon en el tanque, que no estaba diseñado para dicha contingencia. El gas salió al exterior bruscamente formando una nube que chocó con una fuente de ignición, provocando la explosión.

Como consecuencia de la explosión se produjo la muerte de 9 trabajadores de la planta, 10 heridos, de los cuales 9 pertenecían al equipo de emergencia y graves daños materiales con un coste de más de 50 millones de euros.

- Accidente de la Industria Química del Óxido de Etileno (IQOXE), Tarragona (2020).

El 14 de enero de 2020 durante la noche se produjo la explosión y posterior incendio de un reactor de la planta petroquímica de Tarragona.

La planta que explotó pertenece a la empresa IQOXE, una petroquímica que se dedica a producir óxido de etileno y otras sustancias que se utilizan para fabricar plastificantes, detergentes, anticongelantes y, en menor medida, materiales que sirven para esterilizar equipos médicos.

La explosión ocasionó que una pieza del reactor, con un peso de una tonelada, saliera disparada cayendo sobre una vivienda y ocasionando la muerte de una persona. Esta no fue la única muerte, ya que dos trabajadores de la planta terminaron muriendo debido a los desperfectos del sistema de seguridad industrial.



Figura 4-4. Incendio de un tanque de la Petroquímica IQOXE en Tarragona.

En los últimos años se ha producido una importante evolución en cuanto a los niveles de seguridad industrial, tanto en procesos industriales como en equipos. De hecho, el accidente ocurrido en Seveso (Italia) ha desencadenado y dado nombre a la Directiva de la Unión Europea relativa al control de riesgos por accidentes graves en los que estén implicadas sustancias peligrosas.

Para finalizar, se ha de mencionar el último accidente ocurrido hasta la actualidad, más concretamente el accidente del 4 de agosto de 2020 en Beirut, Líbano.

- Explosión en el puerto de Beirut, Líbano (2020).

El 4 de agosto de 2020 hubo una explosión en la zona portuaria de la capital libanesa, Beirut. A esta explosión le precedió un incendio con pequeñas explosiones que finalizaron con una detonación, que provocó una gran onda expansiva.

El accidente ocurrió en un almacén del puerto de Beirut que almacenaba más de 2.700 toneladas de nitrato de amonio, un material altamente reactivo que estaba siendo almacenado sin ninguna medida de seguridad.

Este fatal accidente finalizó con 137 fallecidos y más de 5.000 heridos.

Figura 4-5. Explosión en el puerto de Beirut (2020) [6].



5. TOXICOLOGÍA INDUSTRIAL

La toxicología industrial u ocupacional, analiza los efectos en la salud que tiene la exposición a determinadas sustancias químicas en el lugar de trabajo.

Existen pocos antecedentes históricos de esta rama de la toxicología y para una mayor comprensión es necesario tener en cuenta los aspectos que se desarrollan a continuación [2].

5.1. Dosis-efecto y dosis-respuesta

Para comprender mejor ambos términos es necesario tener en cuenta los conceptos: dosis, efecto y respuesta.

La dosis viene determinada a través de la siguiente ecuación:

$$D = \frac{c\theta q}{P} \quad (5-1)$$

Donde:

- D = dosis inhalada por unidad de peso del individuo (mg/kg o $\mu\text{g}/\text{kg}$).
- θ = tiempo de exposición (horas).
- c = concentración medida en el ambiente (mg/m^3 o $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- q = caudal respirado (m^3/h), se puede considerar un valor promedio de $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$.
- P = peso medio del individuo (kg).

Los estudios epidemiológicos tienen por objeto el establecimiento de las relaciones entre dosis y efecto, así como las relaciones o funciones que ligan dosis y respuesta. Para ello, se requieren datos experimentales, y debido a la falta de colaboración, lo más normal es que estos experimentos se realicen con animales (ratones, cerdos, etc.), considerando la semejanza en términos de dosis en mg/kg o $\mu\text{g}/\text{kg}$. De esta manera se establecen dosis para un efecto serio (como la mortandad) con una respuesta dada: LD₅₀, LC₅₀, TD₅₀ [2].

5.2. Dosis: Límites, umbrales, etc

Existen diferentes expresiones relativas a las dosis admisibles o inadmisibles para los humanos. Las entidades pioneras en esta materia se encuentran en Estados Unidos y son las que se mencionan a continuación: OSHA (Occupational Safety and Health Administration), NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), ACGIH (American Conference Governmental of Industrial Hygienists), DOE (Department of Energy) y EPA (Environmental Protection Agency). En el ámbito de la Unión Europea, se encuentra la AESST (Agencia Europea para la Seguridad y Salud en el Trabajo) y en España, el organismo de referencia es el INSST (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo) organismo autónomo de carácter administrativo adscrito al Ministerio de Trabajo [2].

5.2.1. Valores absolutos

Estos valores se emplean generalmente como indicadores de peligrosidad y están referidos a los animales ensayados que deben de indicarse: UL₁₀₀, UL₅₀ (LD₅₀, LC₅₀, TD₅₀) UL₁ (Probit. Véase en el apartado 6.2.), IPVS (IDHL), TOPES (CEILING). Además, en el caso de accidentes graves también se tiene en cuenta los valores AEGL, según la Directiva Seveso.

- UL₁₀₀: Umbral de letalidad 100%. Mortalidad del 100% para todos los animales ensayados. Se emplea con poca frecuencia.
- UL₅₀: Umbral de letalidad 50%. La mitad de los animales ensayados fallecen o desarrollan tumores cancerígenos. Se emplean como indicadores de peligrosidad tóxica de las sustancias. También caben destacar:
 - LD₅₀: dosis (mg/kg o µg/kg) con efecto mortal del 50% de la población.
 - LC₅₀: concentraciones (mg/m³ o µg/m³) con efecto mortal para el 50% de la población. En la tabla 5-1 se recogen ejemplos de niveles de toxicidad en función del LD₅₀ agudo oral de las ratas, en la que se tienen en cuenta diversas sustancias cuya definición podemos encontrar en el índice de contenidos.
 - TD₅₀: dosis diaria (mg/m³·día) en el que el 50% de la población desarrolla tumores.

Tabla 5-1. Aplicación del índice LD50 para la calificación de riesgos tóxicos.

LD ₅₀ agudo oral ratas	Clasificación de toxicidad
≤ 1 mg/kg o inferior (dioxina, tributirina)	Extremadamente tóxico
1-50 mg/kg (estricnina)	Muy tóxico
50-500 mg/kg (DDT)	Moderadamente tóxico
0,5-5 g/kg (morfina)	Suavemente tóxico
5-15 g/kg (alcohol etílico)	Umbral de toxicidad

- IPVS: Valor inmediatamente peligroso para la vida y la salud (IDHL, *immediatly dangerous for health and life*, definido por la OSHA en Estados Unidos). Este indicador fue una referencia en la Directiva Seveso I.
- TOPES: Denominado como *ceilings*. Se trata de cualquier indicador que se emplea como valor umbral de intolerabilidad, generalmente para exposiciones muy cortas.
- AEGL: Definidos como *acute exposure guideline levels*. Se trata de tres niveles referidos a la población general, incluyendo a los individuos susceptibles, pero no hipersusceptibles (Directiva Seveso II):
 - a. AEGL3: La población experimenta efectos amenazantes para la vida o la muerte.
 - b. AEGL2: La población experimenta efectos a largo plazo serios o irreversibles.
 - c. AEGL1: La población experimenta una incomodidad notable (olor ligero y sabor sensorial leve).
- Otros: LOAEL (*lowest observed adverse effects level*); NOAEL (*no observed adverse effects level*).

5.2.2. Valores referidos a tiempos de exposición

Implementados por el DOE y que hacen referencia a la Directiva Seveso II.

- ERPG: Definidos como *emergency response planning guidelines*. Considera a casi todos los individuos expuestos durante una hora. Para tiempos superiores, los valores de ERPG se corrigen de la siguiente forma:

$$ERPG = ERPG_{60} \frac{60}{\theta} \quad (5-2)$$

Donde ERPG es el valor correspondiente a un tiempo de exposición θ (superior a 60 minutos) y ERPG₆₀ el valor correspondiente a un tiempo de exposición de 60 minutos.

- ERPG3: Máxima concentración a la cual un individuo puede estar expuesto hasta una hora sin experimentar efectos que amenacen la vida.
- ERPG2: Máxima concentración a la cual un individuo puede estar expuesto hasta una hora sin experimentar efectos serios o irreversibles.
- ERPG1: Máxima concentración a la cual un individuo puede estar expuesto hasta una hora sin experimentar efectos ligeros y transitorios.

- TEEL: Definidos como *temporary emergency exposure limits*. Se trata de considerar a casi todos los individuos expuestos durante un tiempo de 15 minutos. Para tiempos superiores se puede emplear la siguiente corrección:

$$TEEL = TEEL_{15} \frac{15}{\theta} \quad (5-3)$$

Donde TEEL es el valor correspondiente a un tiempo de exposición θ y $TEEL_{15}$ el valor correspondiente a un tiempo de exposición de 15 minutos.

- TEEL3: Máxima concentración a la cual todos los individuos experimentan efectos amenazantes para la vida.
- TEEL2: Máxima concentración a la cual todos los individuos experimentan efectos serios o irreversibles.
- TEEL1: Máxima concentración a la cual todos los individuos experimentan efectos ligeros y transitorios sobre la salud.
- TEEL0: Concentración a la cual no se detecta efecto sobre la salud.
- AEGL: definidos como *acute exposure guideline levels*.
 - AEGL1: concentración por encima de la cual se predice que la población general puede experimentar incomodidad notable. Concentraciones por debajo de este nivel supone que el usuario perciba cierto olor, sabor u irritación sensorial leve.
 - AEGL2: concentraciones por encima de la cual se predice que la población general puede experimentar efectos a largo plazo serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar de la zona.
 - AEGL3: concentración por encima de la cual se predice que la población general podría experimentar efectos amenazantes para la vida.

5.2.3. Valores medios ponderados en el tiempo

Se emplean para asignarlos a las exposiciones de los trabajadores o profesionales del sector.

- STEL: Definido como *short term exposure level* (OSHA). Es aplicable a otros indicadores en los que el tiempo de exposición es de 15 o 30 minutos.
- TWA: Definido como *time weighted averages*. Considera 8 o 10 horas diarias de exposición durante 40 horas a la semana.
- PEL: Definido como *permissible exposure limits*. Considera exposiciones de 8 horas diarias (40 horas semanales). Es el único indicador con fuerza legal empleado en Estados Unidos.
- LEP: Definido como *límites de exposición profesional*. Definido por la Unión Europea como valor vinculante en el cual los estados miembros se comprometen a no rebasar dichos valores en sus reglamentos nacionales.
- TLV: Definido como *threshold limit values*. Estos valores han quedado anticuados, actualmente se consideran como datos orientativos a efectos de riesgos tóxicos para la salud.
- REL: Definidos como *recommended exposure limits*. Consideran exposiciones de 10 horas diarias, durante un total de 40 horas a la semana. Estos valores deben ser inferiores a los PEL.
- VLA: Definidos como *valores límite ambientales*.
- VLA-EC: Exposiciones cortas (15 minutos).
- VLA-ED: Exposiciones diarias (8 horas diarias, sin referencia semanal).
- VLB: Definidos como *valores límite biológicos*. Estos valores suelen ser indicadores absolutos.

6. MODELOS DE ACCIDENTES

6.1. Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera

En el análisis de estimación de consecuencias de las emisiones accidentales a la atmósfera de contaminantes procedentes de la actividad industrial, se debe tener en cuenta la dispersión de los mismos sobre el medio ambiente.

Para la estimación de emisiones instantáneas, lo primero que se debe tener en cuenta son las condiciones de fuga del producto químico, más concretamente su duración en el tiempo. Por ello, dependiendo del tiempo de fuga del producto las emisiones se clasifican en [7]:

- Continuas: cuando el tiempo de emisión es mayor que el tiempo que requiere la nube para alcanzar un determinado punto.
- Instantáneas: cuando el tiempo necesario para que la nube llegue a un determinado punto es mayor que el tiempo de emisión del producto. Es te tipo de emisión, forma una nube que se va dispersando con el tiempo. Gráficamente se asimila a una nube casi esférica que se dispersa, trasladándose en la dirección del viento (Figura 6-1.).

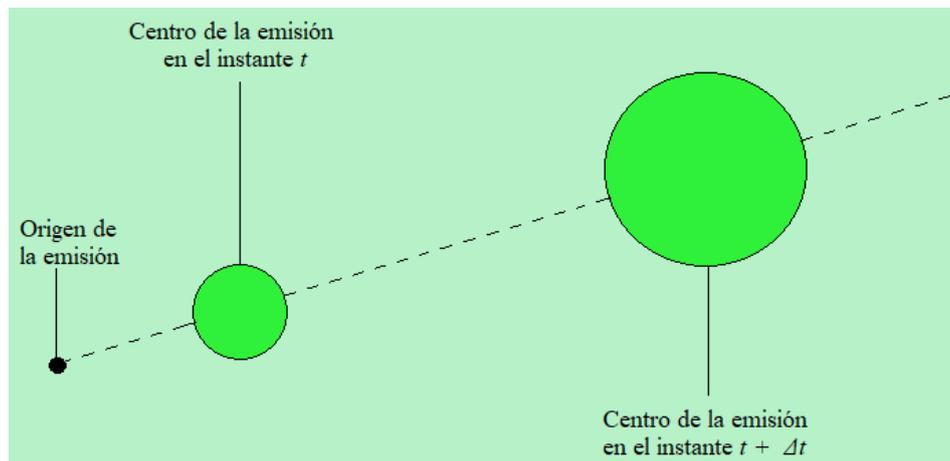


Figura 6-1. Representación gráfica de la evolución de una nube de gas proveniente de una fuente instantánea [7].

Para considerar si una fuga es instantánea o continua, existe un criterio que se muestra a continuación (Tabla 6-1.):

Tabla 6-1. Valor para cada tipo de fuga.

TIPO DE FUGA	VALOR
Continua	$x < 1,8 \cdot u_w \cdot t_e$
Instantánea	$x > 1,8 \cdot u_w \cdot t_e$

Donde:

- x = distancia de la coordenada en la dirección del viento (m).
- u_w = velocidad del viento (m/s).
- t_e = duración de la emisión (s).

Para una emisión instantánea los cálculos se establecen de la misma forma que para una emisión continua, es decir, se asume que la nube tiene una distribución gaussiana en las direcciones de los ejes x, y, z.

Para el cálculo de la concentración en un punto, ocasionado por una fuga instantánea, la concentración en dicho punto dependerá de sus coordenadas de posición (x, y, z) y del tiempo transcurrido desde que se originó la fuga (t).

La concentración en el punto x, y, z, en el tiempo, empleando el modelo gaussiano viene dado por:

$$C(x, y, z, t) = \frac{M}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot A \cdot B \cdot C \quad (6-1)$$

Siendo:

- A, B y C determinadas por:

$$A = e^{-\frac{(x-u_w t)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (6-2)$$

$$B = e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (6-3)$$

$$C = e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (6-4)$$

C = concentración (kg/m³)

M = masa de la emisión (kg).

h = altura efectiva de la fuente de emisión (m). (h = 0 para emisiones a ras de suelo).

En cuanto al cálculo de los coeficientes de dispersión ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) para emisiones continuas, estos se ajustan a las distancias que van desde 100 m a 10 km, y se calculan mediante la expresión siguiente:

$$\sigma_y = a \cdot x^b \quad (6-5)$$

$$\sigma_z = c \cdot x^d \quad (6-6)$$

En el caso de que las distancias sean inferiores a 100 m se puede realizar una interpolación lineal entre 0 y el valor de los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z a 100 m.

Para fugas instantáneas, los cálculos se realizan mediante las siguientes expresiones:

$$\sigma_x = 0,13 \cdot x \quad (6-7)$$

$$\sigma_y = 0,5 \cdot \sigma_{yc} \quad (6-8)$$

$$\sigma_z = \sigma_{zc} \quad (6-9)$$

Donde:

- σ_x = desviación tipo en el eje x (m).
- σ_y = desviación tipo en el eje y (m).
- σ_z = desviación tipo en el eje z (m).
- σ_{yc} = desviación tipo en el eje y para fugas continuas (m).
- σ_{zc} = desviación tipo en el eje z para fugas continuas (m).

Estas ecuaciones vienen representadas de forma gráfica en las Figuras 6, 7 y 8 para las distintas categorías de estabilidad atmosférica a nivel del suelo y para una rugosidad $z_0 = 0,1$ m.

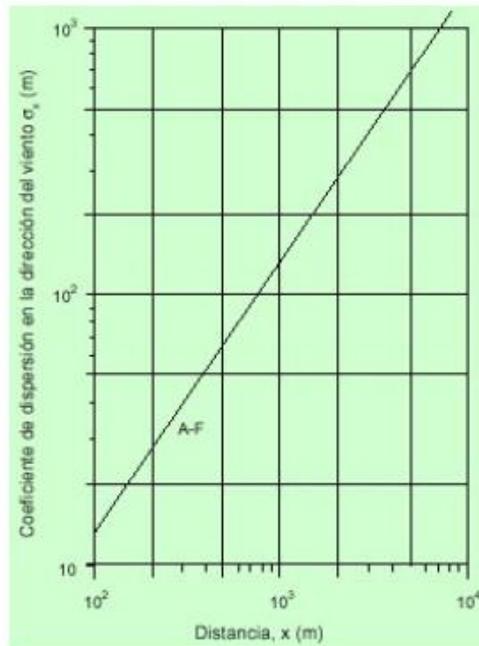


Figura 6-2. Coeficiente de dispersión para cualquier tipo de estabilidad atmosférica en la dirección del viento σ_x [7].

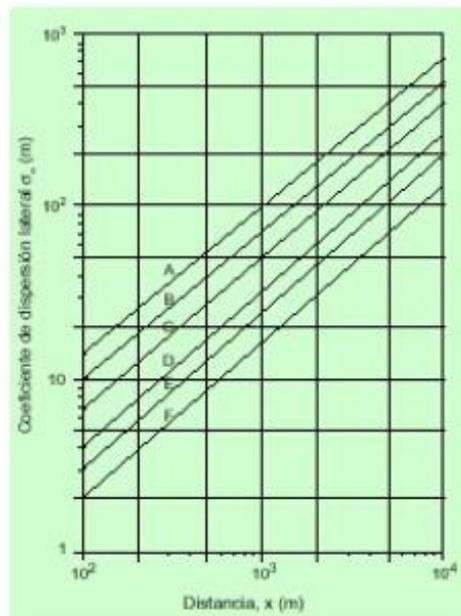


Figura 6-3. Coeficiente de dispersión lateral σ_y , según la distancia [7].

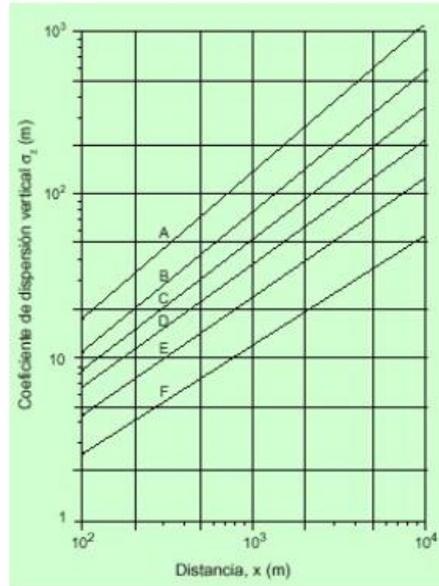


Figura 6-4. Coeficiente de dispersión vertical σ_z , según la distancia [7].

Es muy importante tener en cuenta la rugosidad del terreno, en la cual se incluye la vegetación, los cultivos y los edificios. En la Tabla 6-5, se muestran valores de los coeficientes a, b, c y d, para el cálculo de las desviaciones tipo σ_y y σ_z , en aquellos casos en los que la rugosidad (z_0) sea de 0,1 m para una emisión continua. Estos como se ha señalado anteriormente, pueden ser empleados como valores de σ_{yc} y σ_{zc} en las ecuaciones (número de ecuación) para fugas instantáneas. En el caso de que la rugosidad sea superior debe acudir a la bibliografía (ref. 2 del informe). En la Tabla 6-5 se muestran algunos de los valores más representativos de z_0 .

Figura 6-5. Coeficientes para el cálculo de σ_y (valores promedio en un intervalo de 10 minutos) y σ_z (altura de la fuente de emisión <20 m y una rugosidad del terreno $z_0 = 0,1$ m) según la categoría de estabilidad atmosférica [7].

CLASE DE ESTABILIDAD	a	b	c	d
A: Muy inestable	0,527	0,865	0,28	0,90
B: Inestable	0,371	0,866	0,23	0,85
C: Ligeramente inestable	0,209	0,897	0,22	0,80
D: Neutra	0,128	0,905	0,20	0,76
E: Estable	0,098	0,902	0,15	0,73
F: Muy estable	0,065	0,902	0,12	0,67

Figura 6-6. Valores de la rugosidad z_0 para distintas zonas [7].

TERRENO LLANO CON POCOS ÁRBOLES	0,03 m
TERRENO AGRÍCOLA (árboles abundantes, tierra arable...)	0,10 m
TERRENO CULTIVADO (cultivos, vegetación, casas aisladas...)	0,30 m
ÁREA RESIDENCIAL (construcción densa de poca altura...)	1,00 m
ÁREA URBANA (edificios altos e industriales con estructuras altas...)	3,00 m

Los valores de σ_y no se ven afectados por la rugosidad del terreno, mientras que los valores de σ_z que se obtienen de los coeficientes c y d , dados en la Tabla 6-5 pueden emplearse para valores de $z_0 = 0,1$ m. Para otros valores de z_0 es necesario introducir una corrección:

$$\sigma_z = c \cdot x^d (10 \cdot z_0)^m \quad (6-10)$$

Siendo:

$$m = 0,53 \times x^{-0,22} \quad (6-11)$$

Para conocer el orden de magnitud del alcance máximo de una fuga instantánea, es suficiente calcular la concentración a una distancia x del punto de fuga en la dirección del viento ($y = 0$), a nivel del suelo ($z = 0$), con $t = x/u_w$, es decir, cuando el centro de la nube llega al observador.

A partir de la fórmula general, sustituyendo los valores de los coeficientes de dispersión correspondientes valores de a , b , c y d se obtiene:

$$C(x, 0, 0, x/U_w) = \frac{M}{[(2\pi)^{3/2} \cdot 0,13 \cdot 0,5 \cdot a \cdot c \cdot x^{(1+b+d)}]} \quad (6-12)$$

Otros datos de interés en la distancia límite son: la concentración peligrosa para la salud (Índice inmediatamente Peligroso para la Vida o la Salud, IPVS), la concentración letal (LC 50) y la concentración con riesgo de explosión (L.I.E.).

6.2. Radiación térmica en incendios de líquidos y gases

Los accidentes producidos por escape de gases inflamables o líquidos pueden dar lugar a la formación de un charco ardiendo, una bola de fuego o un incendio tipo llamarada, cuando el combustible entra en contacto con un foco de ignición.

Para poder modelar los accidentes de tipo térmico es necesario basarse en que estos tienen una base circular o rectangular situada sobre el nivel del suelo. Es muy importante el tamaño de la superficie del charco formado y a efectos de su cálculo se toma la superficie alcanzada inmediatamente después del derrame y supuesta constante.

En el caso de que el charco tenga una base rectangular, se considera la razón longitud/altura, la cual nos determina el alcance y la forma en que se puede utilizar el modelo [8].

6.2.1. Radiación térmica en un incendio

La intensidad de la radiación térmica recibida por un ser vivo u objeto situado en el área de influencia del incendio depende de las condiciones atmosféricas (humedad ambiente), de la geometría del incendio (diámetro de la base del incendio, altura de las llamas y distancia al punto irradiado) y de las características físico-químicas del producto en combustión.

Para determinar la intensidad de irradiación por unidad de superficie recibida en un punto P situado a una distancia c del incendio se emplea la siguiente ecuación:

$$q = d \cdot F \cdot E \quad (6-13)$$

Siendo:

- q = Intensidad de irradiación a una distancia determinada (kW/m^2).
- d = Coeficiente de transmisión atmosférica (adimensional).
- F = Factor geométrico de visión, de vista o de forma (adimensional).

- $E =$ Intensidad media de radiación de la llama (kW/m^2).

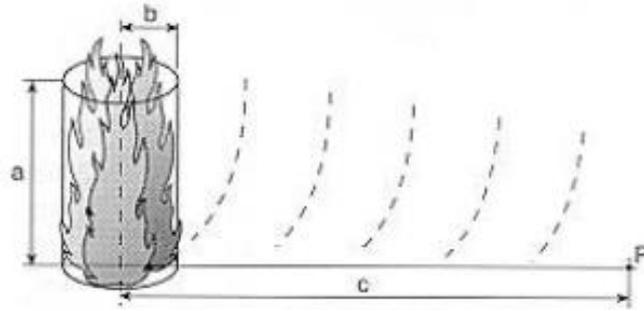


Figura 6-7. Forma cilíndrico vertical de un incendio [8].

- a) Coeficiente de transmisión atmosférica (d).

Una parte del calor radiado es absorbida por el aire existente entre el objeto expuesto a la radiación y el incendio y es lo que se conoce como coeficiente de transmisión atmosférica (d). El valor de d es función de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera existente entre el foco emisor y el receptor. La obtención de este parámetro se puede realizar mediante una fórmula empírica o gráficos.

Para el cálculo de d mediante la fórmula empírica, la más empleada es la propuesta por Pietersen y Huerta, siendo:

$$d = 2,02 (P_v \cdot x)^{-0,09} \quad (6-14)$$

Siendo:

- $P_v =$ Presión parcial del vapor de agua a la temperatura determinada (Pa).
- $x =$ Longitud de recorrido de la radiación, distancia desde la superficie de llama al blanco receptor (m).

Para el cálculo de la presión parcial del agua se emplea la humedad relativa del aire ambiental y los valores de las presiones de vapor saturado a diferentes temperaturas dados en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2. Presión de vapor saturado del agua (Pa) en función de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) [8].

Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Presión de vapor (Pa)	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Presión de vapor (Pa)
0	600	19	2170
2	700	20	2310
4	800	21	2450
6	920	22	2610
8	1060	23	2770
10	1210	24	2940
11	1300	25	3130
12	1380	26	3320
14	1580	27	3520
15	1680	28	3730
16	1790	29	3950
17	1920	30	4190
18	2040		

En los gráficos se relaciona el coeficiente de transmisión atmosférica en función de la distancia c para diferentes temperaturas ambientales y grados de humedad relativa.

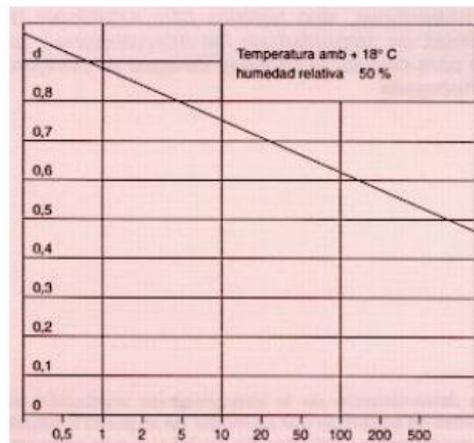


Figura 6-8. Coeficiente de transmisión d en función de la distancia c [8].

b) Factor de visión geométrico (F).

Este coeficiente valora el efecto de la forma geométrica de las llamas (altura alcanzada y dimensiones de la superficie de líquido incendiada), de la distancia al punto P o superficie irradiada y de la posición u orientación (horizontal, vertical o inclinada). En el caso de que las superficies sean verticales este factor se simboliza como F_v , si son horizontales F_h y cuando en la superficie inclinada la irradiación es máxima como $F_{m\acute{a}x}$.

El cálculo de este factor para diferentes configuraciones a las cuales un objeto puede estar expuesto viene recogido en tablas de valores o gráficos de cálculo.

Para calcular el valor de la altura de llama de un incendio de forma cilíndrica vertical, se emplea la siguiente fórmula empírica:

$$a = 29 b^{0,7} m^{0,6} \quad (6-15)$$

Siendo:

- b = Radio del recipiente (m).
 - m = Caudal de producto evaporado o tasa de combustión ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$).
- c) Intensidad de radiación de la llama (E).

La intensidad de radiación de la llama depende del tipo de combustible y del diámetro de la base del líquido incendiado.

Esta dependencia del factor E por el diámetro se debe a:

- El diámetro afecta al nivel de turbulencia de una llama.
- La intensidad de radiación depende del diámetro si la llama es ópticamente transparente.
- Un mayor diámetro de llama provoca una mayor generación de humo negro y hollín como consecuencia de la disminución de oxígeno en la parte interna del incendio.
- La intensidad de radiación de forma general varía entre 40 y 140 kW/m^2 .

Los valores de dicho factor vienen recogidos en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3. Intensidad media de radiación de la superficie de llama (kW/m^2) [8].

LÍQUIDOS CON TEMPERATURA EBULLICIÓN > TEMPERATURA AMBIENTE (CHARCOS NO HIRVIENTES)		LÍQUIDOS CON TE < TA (CHARCOS HIRVIENTES)	
Acetato de vinilo	30	Acetaldehído	32
Acetonitrilo	37	Amoniaco	13
Acilonitrilo	26	Butadieno	86
Ácido fórmico	≈ 2	Butano	94
Alcohol alílico	38	Bromuro de metilo	8
Acrilato de metilo	30	Butileno	93
Benceno	70	Cloruro de etilo	14
Bromo		Cloruro de metilo	14
N-butil mercaptano	85	Cloruro de vinilo	26
T-butil mercaptano	73	Dimetilamina	61
Cloroformo	≈ 1	Etano	89
Cloruro de alilo	32	Etileno	89
Dicloropropano	20	Metano	95
Diethylamina	77	Óxido de etileno	35
Disulfuro de carbono	16	Monóxido de carbono	14
Epíclorhidrina	22	Propano	92
Etilendiamina	30	Propileno	93
Etil mercaptano	59	Sulfuro de hidrógeno	20
Formiato de etilo	30		
Formato de metilo	19		
Metanol	15		
Nafta disolvente	68		
Óxido de propileno	45		
Tetracloruro de carbono	≈ 1		
Tetraetilo de plomo	20		
Tetrahidrotiofeno			

Finalmente, para la evaluación de las consecuencias posibles provocadas por la radiación térmica de un incendio de un determinado producto y dimensiones se calcula la irradiación, q , recibida a las distancias a considerar.

Los valores de la irradiación recibida en función de la distancia son comparados con referencias, como las que se muestran en la Tabla 6-4, que dan la máxima radiación tolerable por personas y materiales.

Tabla 6-4. Máxima radiación tolerable por personas y materiales [8].

MÁXIMA RADIACIÓN TOLERABLE	
Materiales	Irradiación térmica kW/m ²
Pared de ladrillos	400
Hormigón armado	200
Cemento	60
Acero	40
Madera	10
Personas	
Durante 20 s. sin quemaduras	6,5
Bomberos y personas protegidas	4,7
Personas desprotegidas	4,0

La Directriz Básica (BOE 6/2/1991) para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico se establecen unos umbrales que deberán adoptarse para la delimitación de la Zona de Intervención y la Zona de Alerta que son 5 kW/m² con un tiempo máximo de exposición de 3 minutos y 3 kW/m² sin tiempo máximo de exposición.

El límite soportable por las personas, teniendo en cuenta que la radiación recibida por el sol en un día de verano es de 1 kW/m², es de 4 a 5 kW/m².

Otro método de estimación de consecuencias en un determinado grupo de población es la “Función Probit”. Esta función presenta la siguiente ecuación empírica:

$$Probit = a + b \cdot \ln D \quad (6-16)$$

Donde:

- D = Dosis (W^{4/3}/m^{2,4/3})

Una vez determinado el valor de la función Probit se puede obtener el porcentaje de personas afectadas a través de la Tabla 6-5.

Tabla 6-5. Porcentaje de personas afectadas según la Función Probit [8].

PORCENTAJE	PROBIT
1	2,67
10	3,72
20	4,16
30	4,48
40	4,75
50	5,00
60	5,25
70	5,52
80	5,84
90	6,26
99	7,33
99,9	8,09

Además, la función Probit permite calcular dentro de las dimensiones de una BLEVE, Pool Fire, o nube de gas inflamable, la muerte por quemaduras o por asfixia a través de las siguientes ecuaciones:

- Quemaduras de Primer Grado.

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t) \quad (6-17)$$

- Quemaduras de Segundo Grado.

$$Pr = -43,14 + 3,0188 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t) \quad (6-18)$$

- Letalidad con ropas de protección.

$$Pr = -37,23 + 2,56 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t) \quad (6-19)$$

- Letalidad sin ropas de protección.

$$Pr = -36,38 + 2,56 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t) \quad (6-20)$$

6.3. Explosiones de nubes de vapor no confinadas.

En este apartado se van a considerar las explosiones de nubes de vapor no confinadas que consiste en una deflagración explosiva de una nube de gas inflamables que se halla en un espacio amplio, con una onda de presión que alcanza una sobrepresión máxima en la zona de ignición.

Este tipo de explosiones tienen lugar al aire libre y generalmente se producen por un escape rápido de un fluido inflamable junto a una dispersión moderada para que se forme una nube inflamable de aire e hidrocarburo [9].

6.3.1. Modelo TNT de evaluación.

Para la evaluación de las consecuencias de una explosión existen diversos modelos que determinan los parámetros necesarios, siendo el más empleado el modelo TNT (trinitrotolueno) de evaluación. Este modelo se basa en la hipótesis de la equivalencia en efectos explosivos entre una masa determinada de materia inflamable y otra de TNT.

La forma de la onda inicial de la explosión es diferente que la forma de una explosión de TNT, pero a partir de una determinada distancia ambas se consideran similares. El modelo establece la siguiente relación:

$$W = \frac{\eta M \cdot H_c}{H_{cTNT}} \quad (6-21)$$

Donde:

W = Masa equivalente de TNT (kg).

M = Masa de sustancia inflamable liberada (kg).

η = Rendimiento empírico de la explosión (≤ 15).

H_c = Entalpía de combustión del gas o vapor inflamable.

H_{cTNT} = Entalpía de combustión del TNT (4250 kJ/kg).

En cuanto al procedimiento a seguir para la obtención de los parámetros necesarios para la evaluación de las consecuencias de la explosión es:

1. Cálculo de la masa equivalente de TNT mediante la fórmula expuesta anteriormente, adoptando un rendimiento máximo del 10%.
2. Una vez calculada la masa equivalente de TNT se debe emplear el gráfico de la Figura X que nos da los parámetros más importantes en función de la distancia escalada Z. Esta es definida como el cociente entre la distancia real del centro de la explosión al lugar considerado y la raíz cúbica de la masa equivalente de TNT calculada anteriormente. Siendo la expresión:

$$Z = \frac{X}{W^{1/3}} \quad (6-22)$$

X = Distancia real en metros (m).

W = Masa equivalente de TNT en kilogramos (kg).

Para calcular el valor de Z se emplea la siguiente gráfica.

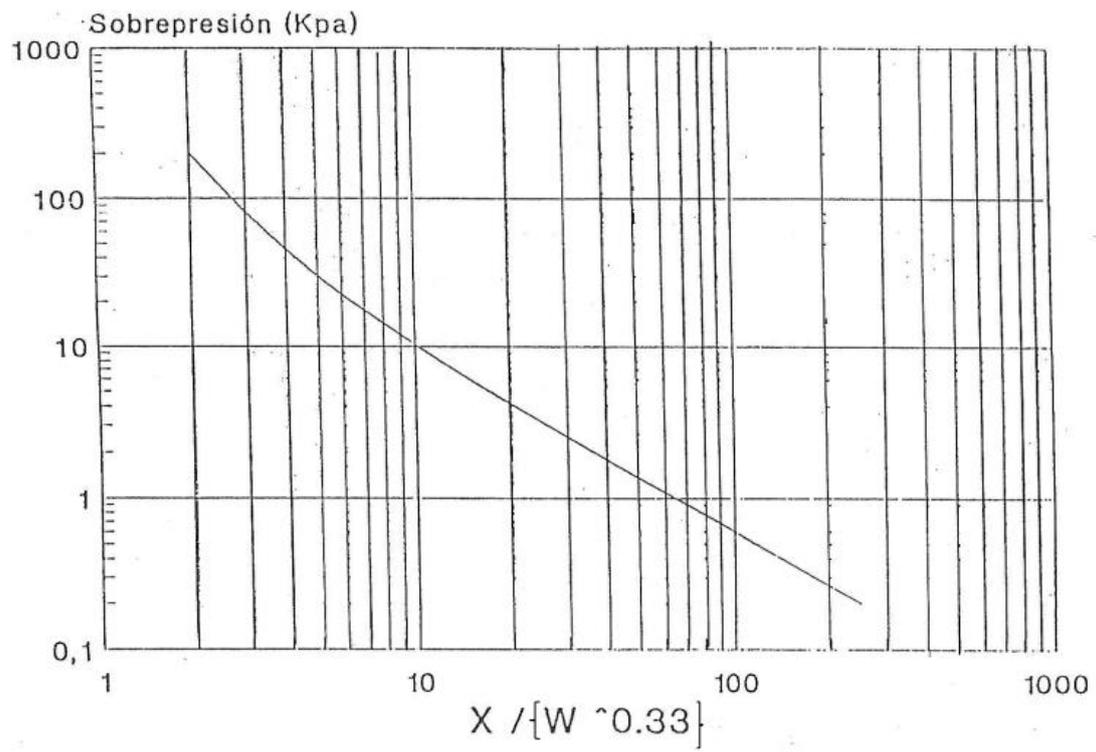


Figura 6-9. Gráfico para el cálculo de la sobrepresión de una BLEVE [9].

7. LEGISLACIÓN APLICABLE A LA SEGURIDAD INDUSTRIAL

En este apartado se mostrará la normativa relacionada con la prevención y o protección frente a accidentes en la Industria Química. Para ello, se tendrán en cuenta tanto la normativa laboral como la reglamentación industrial, la normativa relativa a Protección Civil y las normas UNE o UNE-EN.

El objeto común de la legislación industrial está en la seguridad de las personas, bienes y medio ambiente.

7.1. Marco Legislativo

La Comunidad Europea influye en la legislación española por dos vías:

- a) Directivas: estas deben ser transpuestas mediante la legislación española que debe publicarse en el Boletín Oficial del Estado (BOE).
- b) Reglamentos: son de fuerza legal, por lo que no requieren de su transposición una vez que han sido publicado en el Diario Oficial de la Comunidad Europea (DOCE).

Otra fuente supranacional de la legislación española son los acuerdos internacionales a los cuales España se adhiere y que por tanto se publican en el BOE.

Por consiguiente, la legislación española se clasifica en diversos escalones legislativos:

- a) Leyes: incluyen declaraciones de principios, asignaciones de atribuciones, etc.
- b) Reglamentos: suelen diferenciarse dos tipos:
 - a. Reales decretos. Este tipo de texto legal contiene: un objeto; campo de aplicación; asignación de funciones y competencia; documentación preceptiva; autorizaciones; inspecciones periódicas; normas; infracciones, sanciones y recursos; regímenes transitorios y adaptación de instalaciones y derogaciones totales o parciales.
 - b. Instrucciones técnicas complementarias (ITC). Estas integran la parte de mayor transcendencia técnica. Constan de un objeto, de un campo de aplicación, de definición, preceptos de los proyectos, de su construcción y explotación y obligaciones y responsabilidades.

Por tanto, la legislación industrial en España se puede clasificar como se muestra en la siguiente figura:

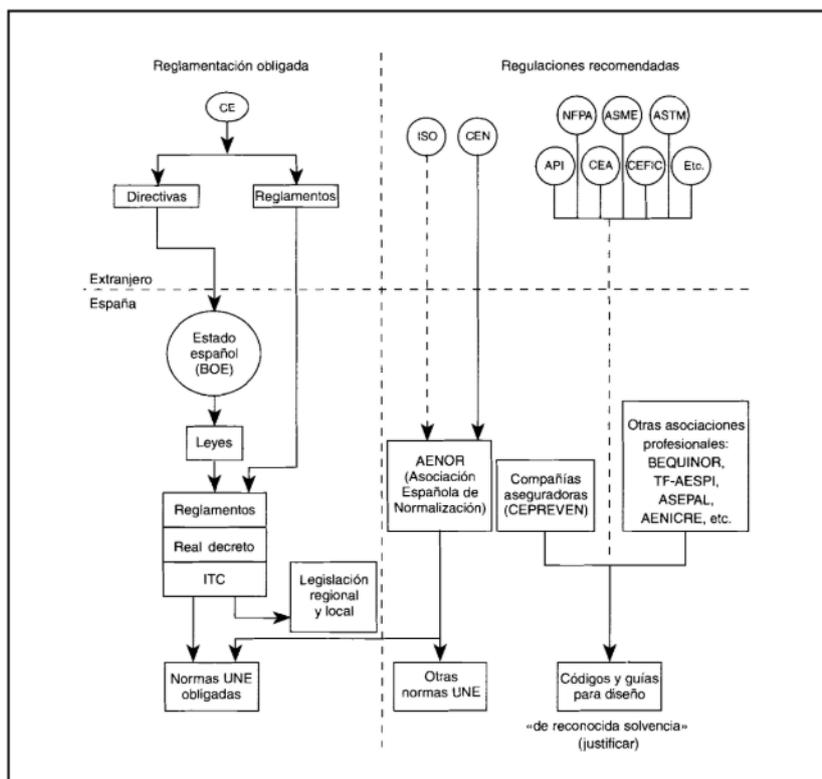


Figura 7-1. Panorama de la legislación industrial española [10].

En cuanto a la reglamentación laboral en España podemos destacar normas generales y normas específicas que son:

Tabla 7-1. Legislación laboral de aplicación general y de aplicación específica para la Industria Química.

GENERALES	ESPECÍFICAS DE LA INDSTRIA QUÍMICA
Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales	Real Decreto 833/1988 , de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, básica de Residuos tóxicos y peligrosos.
Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los servicios de prevención	Real Decreto 665/1997 , de 12 de mayo, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo
Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo	Real Decreto 773/1997 , de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual
Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo	Real Decreto 374/2001 , de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo
	Real Decreto 681/2003 , de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los

Orden TAS/2947/2007, de 8 de octubre, por la que se establece el suministro a las empresas de botiquines con material de primeros auxilios en caso de accidente de trabajo, como parte de la acción protectora del sistema de la Seguridad Social	trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo
	Real Decreto 396/2006 , de 31 de marzo, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud aplicables a los trabajos con riesgo de exposición al amianto
	Real Decreto 144/2016 , de 8 de abril, por el que se establecen los requisitos esenciales de salud y seguridad exigibles a los aparatos y sistemas de protección para su uso en atmósferas potencialmente explosivas y por el que se modifica el Real Decreto 455/2012, de 5 de marzo, por el que se establecen las medidas destinadas a reducir la cantidad de vapores de gasolina emitidos a la atmósfera durante el repostaje de los vehículos de motor en las estaciones de servicio
	Reglamento (UE) 2016/425 del Parlamento Europeo y del Consejo , de 9 de marzo de 2016, relativo a los equipos de protección individual y por el que se deroga la Directiva 89/686/CEE del Consejo

En relación con la reglamentación industrial, se ha tenido en cuenta la normativa que se encuentra en la página web del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.

Tabla 7-2. Legislación industrial de aplicación general y específica para la Industria Química.

GENERALES	ESPECÍFICAS PARA LA INDUSTRIA QUÍMICA
Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria	Real Decreto 1428/1992 , de 27 de noviembre, por el que se dictan las disposiciones de aplicación de la Directiva del Consejo de las Comunidades Europeas 90/396/CEE de 29 de junio, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre los aparatos de gas.
Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la infraestructura para la calidad y la seguridad industrial	Real Decreto 2085/1994 , de 20 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Petrolíferas
Real Decreto 338/2010, de 19 de marzo, por el que se modifica el Reglamento de la Infraestructura para la calidad y seguridad industrial, aprobado por el Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre.	Real Decreto 1523/1999 , de 1 de octubre, por el que se modifica el Reglamento de instalaciones petrolíferas, aprobado por Real Decreto 2085/1994, de 20 de octubre, y las instrucciones técnicas complementarias MI-IP03, aprobada por el Real Decreto 1427/1997, de 15 de septiembre, y MI-IP04, aprobada por el Real Decreto 2201/1995, de 28 de diciembre.

<p>Real Decreto 560/2010, de 7 de mayo, por el que se modifican diversas normas reglamentarias en materia de seguridad industrial para adecuarlas a la Ley 17/2009, de 23 de noviembre, sobre el libre acceso a las actividades de servicios y su ejercicio, y a la Ley 25/2009, de 22 de diciembre, de modificación de diversas leyes para su adaptación a la Ley sobre el libre acceso a las actividades de servicios y su ejercicio</p>	<p>Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales</p>
<p>Real Decreto 1072/2015, de 27 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 2200/1995, de 28 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Infraestructura para la Calidad y la Seguridad Industrial.</p>	<p>Real Decreto 888/2006, de 21 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre almacenamiento de fertilizantes a base de nitrato amónico con un contenido en nitrógeno igual o inferior al 28 por ciento en masa</p>
	<p>Real Decreto 919/2006, de 28 de julio, por el que se aprueba el Reglamento técnico de distribución y utilización de combustibles gaseosos y sus instrucciones técnicas complementarias ICG 01 a 11</p>
	<p>Real Decreto 2060/2008, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias.</p>
	<p>Real Decreto 709/2015, de 24 de julio, por el que se establecen los requisitos esenciales de seguridad para la comercialización de los equipos a presión</p>
	<p>Real Decreto 108/2016, de 18 de marzo, por el que se establecen los requisitos esenciales de seguridad para la comercialización de los recipientes a presión simples.</p>
	<p>Real Decreto 144/2016, de 8 de abril, por el que se establecen los requisitos esenciales de salud y seguridad exigibles a los aparatos y sistemas de protección para su uso en atmósferas potencialmente explosivas y por el que se modifica el Real Decreto 455/2012, de 5 de marzo, por el que se establecen las medidas destinadas a reducir la cantidad de vapores de gasolina emitidos a la atmósfera durante el repostaje de los vehículos de motor en las estaciones de servicio</p>
	<p>Real Decreto 130/2017, de 24 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de Explosivos</p>

Por último, se va a realizar una mención a las distintas normas en materia de protección civil, dentro de la cual destaca el Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se traspone la Directiva Seveso III al ordenamiento jurídico español y la Directriz Básica de Protección ante accidentes graves a través del Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre.

Tabla 7-3. Legislación relativa a la Protección civil.

GENERALES
Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, por el que se aprueba la Norma Básica de Protección Civil.
Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas
Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la Norma Básica de Autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia
Real Decreto 1468/2008, de 5 de septiembre, por el que se modifica el Real Decreto 393/2007, de 23 de marzo, por el que se aprueba la norma básica de autoprotección de los centros, establecimientos y dependencias dedicados a actividades que puedan dar origen a situaciones de emergencia.
Real Decreto 1070/2012, de 13 de julio, por el que se aprueba el Plan estatal de protección civil ante el riesgo químico
Ley 17/2015, de 9 de julio, del Sistema Nacional de Protección Civil
Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas

7.2. Normativa Seveso

Con este real decreto se pretende potenciar los mecanismos para la recopilación de información, el intercambio de la misma entre las autoridades competentes y su difusión. Este real decreto fue informado favorablemente por el Pleno de la Comisión Nacional de Protección Civil en su reunión de 20 de octubre de 2014, así como por la Comisión Interministerial Permanente de Armas y Explosivos en su reunión de 15 de abril de 2015.

El Real Decreto 840/2015 tiene por objeto la prevención de accidentes graves en los que estén involucradas sustancias peligrosas, así como la limitación de sus consecuencias sobre la salud humana, el medio ambiente y los bienes [26].

Su ámbito de aplicación hace referencia a todos aquellos establecimientos en los cuales haya presente una o varias sustancias peligrosas en cantidades iguales o superiores a las especificadas en el Anexo I del presente Real Decreto.

Las novedades que aporta Seveso III son:

- Adaptación al Reglamento 1272/2008 sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas (CLP).
- Mejora de la participación pública tras la creación del Convenio de Aarhus.
- Programa de inspecciones “in situ”.
- Actualización de las sustancias contenidas en el Anexo I.

En cuanto al programa de inspecciones “in situ”, Seveso III establece en su **artículo 21.3.** que incluirán:

- a. Una valorización general de los aspectos de seguridad relevantes.
- b. La zona geográfica cubierto por el plan de inspección.
- c. La relación de los establecimientos cubiertos por el plan.
- d. La relación de los grupos de establecimientos con posible efecto dominó según el artículo 9.
- e. Una lista de los establecimientos en lo que fuentes de peligro o riesgos externos concretos puedan aumentar la probabilidad o las consecuencias de un accidente grave.

- f. Los procedimientos de las inspecciones no rutinarias indicadas en el apartado 5 (se llevarán a cabo para investigar denuncias graves, accidentes graves y conatos de accidentes, incidentes y casos de incumplimiento).
- g. Disposiciones sobre la cooperación entre las diferentes autoridades responsables de las inspecciones.

7.3. Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas (Real Decreto 1196/2003)

El objeto de esta directriz básica es establecer los criterios mínimos que las distintas Administraciones públicas y los titulares de los establecimientos tendrán que tener en cuenta para la prevención y el control de los riesgos de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas [27].

Esta directriz básica recoge numerosas definiciones dentro de las cuales caben destacar:

- Peligro: lo define como la capacidad intrínseca de una sustancia para ocasionar daños a las personas, los bienes y el medio ambiente.
- Riesgo: es la probabilidad de que se produzca un efecto dañino específico en un período de tiempo determinado o en circunstancias determinadas.
- Efecto dominó: es la concatenación de efectos causantes de riesgo que multiplica las consecuencias, debido a que los fenómenos peligrosos pueden afectar, además de los elementos vulnerables exteriores, otros recipientes, tuberías o equipos del mismo establecimiento o de otros establecimientos próximos, de tal manera que se produzca una nueva fuga, incendio, estallido en ellos, que a su vez provoquen nuevos fenómenos peligrosos.

Otra característica de esta directriz es el establecimiento de una serie de índices de exposición entre los que se destacan: ERPG, TEEL y AEGL, los cuales serán desarrollados posteriormente.

7.4. Norma ISO 13.702

Esta norma tiene como título el siguiente: “*Industrias del petróleo y del gas natural. Control y mitigación de incendios y explosiones en instalaciones marítimas de producción. Directrices y requisitos (ISO 13702:2015)*”.

A continuación, se muestra un índice de la norma.

ÍNDICE

1. Alcance.
2. Términos, definiciones y abreviaturas.
3. Objetivos.
4. Evaluación de los riesgos de incendio y explosión; gestión del riesgo.
5. Distribución en planta de la instalación.
6. Sistemas para parada de emergencia y despresurización.
7. Control de la inflamación.
8. Control de derrames.
9. Sistemas para energía eléctrica y de emergencia.
10. Sistemas detectores de fuego y gases.
11. Protección activa contra incendios.
12. Protección pasiva contra incendios.
13. Sistemas de protección y mitigación de explosiones.

14. Evacuación, escape y rescate.

15. Inspección, pruebas y mantenimiento.

Anexo A. Eventos peligrosos típicos con fuego y explosión.

Anexo B. Guía para el control y la mitigación de incendios y explosiones.

Anexo C. Ejemplos típicos de los requisitos de diseño para instalaciones marinas grandes e integradas.

8. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ALMACENAMIENTO Y REGASIFICACIÓN DE HUELVA, ENAGÁS TRANSPORTE, S.A.U.

8.1. Introducción

El progreso de los países desarrollados está muy relacionado con el consumo masivo de combustibles fósiles.

El empleo de este tipo de combustibles y, por consiguiente, el aumento de las industrias químicas encargadas de procesar este tipo de compuestos ha provocado numerosos accidentes. Esta problemática ha desencadenado el desarrollo de una normativa más exigente en cuanto a la manipulación, almacenamiento y transporte de este tipo de sustancias.

Estas normativas tienen por objeto hacer que la Industria Química minimice los posibles accidentes que puedan ocurrir en ella.

8.2. Descripción de la ubicación

A continuación, se incluye información sobre el establecimiento, entorno, características de ubicación, entre otros. Para la determinación del entorno es imprescindible evaluar las características geográficas y demográficas, geológicas, hidrológicas y usos de suelo, la fauna y flora y finalmente la meteorología.

Conocido el entorno en el cual se desarrolla la actividad, se puede realizar las distintas simulaciones de accidentes.

8.2.1. Geografía

La planta de Almacenamiento y Regasificación de Huelva pertenece a la Dirección de Plantas y Almacenamientos, de la filial ENAGÁS Transporte, S.A.U. Se encuentra situada en el polígono industrial de Puerto Nuevo, Torre Arenillas en Palos de la Frontera (Huelva). Sus coordenadas geográficas son: latitud 37° 10' 10,91'' Norte y la longitud 6° 54' 19,82'' Oeste.

En la figura que se muestra a continuación, se incluye la localización de la planta, en la cual quedan reflejadas las siguientes características:

- Emplazamiento y orientación de las principales estructuras de la instalación industrial.
- Carreteras y corrientes de agua que atraviesan la zona.
 - Río Odiel.
 - Plaza Autoridad Puerto Huelva.



Figura 8-1. Emplazamiento de la instalación objeto de modelización.

8.2.2. Demografía

Las poblaciones principales que se encuentran en el entorno de la instalación son las que se recogen en la siguiente tabla, en la cual se indica el número de habitantes, la distancia y la dirección de los núcleos de población con respecto a la instalación.

Tabla 8-1. Datos de poblaciones cercanas [11].

Datos de poblaciones más cercanas			
Nombre	Distancia (km)	Habitantes	Dirección
Punta Umbría	5,78	15.242	NO
Palos de la Frontera	6,91	11.289	N
Huelva	10,49	521.870	NW

8.2.3. Geología

La zona se sitúa en la parte noroccidental de la cuenca del Guadalquivir, en la provincia de Huelva, localizada en una pequeña depresión frente a la costa. Geológicamente se pueden identificar tres partes en el subsuelo de la parcela, que van de mayor profundidad a menor, siendo estas las siguientes [12]:

- Material natural subyacente del triásico, compuesto principalmente por dolomías de color gris oscuro y calizas marrones.
- Material natural perteneciente al cuaternario, compuesto de grava arenosa cementada con carbonato cálcico.
- Material de relleno compuesto por material grueso con alguna capa fina intercalada de tipo arcilloso compactado de forma desigual.

8.2.4. Hidrología

La hidrología superficial de la zona está constituida principalmente por ramblas y torrentes que descargan desde los montes y que sólo se aprecian en periodos de lluvia. También se ha determinado la presencia de agua subterránea en una ubicación comprendida entre 4,1-4,8 m de profundidad muy próxima al nivel del mar, lo que hace que las características de dicha masa de agua subterránea sean muy similares a las del agua de mar [12].

8.2.5. Paisaje

Ya que la presencia de determinados montes se encuentra muy próximos a la costa, la visibilidad en la zona es baja. La localización de otras industrias en la misma zona puede dar lugar también de forma ocasional a la formación de nubes y neblinas que limitan aún más la visibilidad. Por ello, se puede considerar que la calidad paisajística de la zona es baja y singular debido a los fuertes contrastes que representan las industrias frente a las formaciones naturales del entorno.

8.2.6. Patrimonio histórico artístico y medio socioeconómico

Se destacan las actividades logísticas en el transporte de mercancías en la dársena de Escombreras, localizándose numerosas industrias que emplean el atraque por mar como sistema de transporte.

Así mismo, se localizan industrias dedicadas a la producción y distribución de energía eléctrica. Por consiguiente, los sectores económicos que destacan en la zona son el secundario y el terciario, quedando en un segundo plano el sector primario (agricultura). Finalmente, al tratarse de tierras ganadas al mar, no existe ningún yacimiento arqueológico o lugar de interés cultural.

8.2.7. Vegetación y fauna terrestre

La vegetación predominante se corresponde con matorrales bajos situados en las laderas de las montañas. Más concretamente, en la zona en la cual se emplaza ENAGÁS no existe ningún tipo de vegetación ya que el área procede del desmantelamiento de una actividad industrial anterior.

En cuanto a la fauna, no existen ningún tipo de especie que se encuentre bajo ninguna figura de protección, siendo, por tanto, especies de amplio rango de distribución.

8.2.8. Meteorología

Las condiciones meteorológicas son decisivas en la evolución de accidentes graves en los que se encuentran implicadas sustancias peligrosas, en particular aquellos en los que se produce dispersión de sustancias. Por consiguiente, para una correcta evaluación de los posibles efectos que produce un accidente, es necesario conocer los datos meteorológicos de la zona para poder evaluar los riesgos meteorológicos derivados.

Los datos empleados en la caracterización del clima corresponden a observaciones meteorológicas realizadas por el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) en la Estación Meteorológica de Moguer y por la Base de Datos Meteorológica.

Tabla 8-2. Régimen termométrico durante el periodo de abril de 2019 hasta abril de 2020 [13].

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tm °C	9,4	11,2	14,1	14,6	19,4	19,7	22,2	23,7	21,5	17,6	13,7	12,3

Según se observa en la Tabla 8-2, se registran tres meses cálidos, en los cuales las temperaturas medias alcanzadas superan los 20°C, y que corresponden con los meses comprendidos de julio a septiembre, ambos incluidos. Por otro lado, el resto de meses se presentan con un clima templado según los cuales las temperaturas están comprendidas entre 0 y 20°C, concluyendo con la inexistencia de meses en los cuales se registren temperaturas por debajo de los 0°C. Finalmente, se puede observar que los meses más fríos son diciembre, enero y febrero en los cuales la temperatura media se encuentra comprendida entre 9 y 12°C.

Tabla 8-3. Régimen pluviométrico durante el periodo de abril de 2019 hasta abril de 2020.
Fuente: [13].

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ppm	60	52	59	37	28	10	1	1	21	60	75	69

De los datos expuestos y medidos en milímetros, se observa que las mínimas precipitaciones se concentran en los meses de verano, con una breve excepción de que en julio se alcanza un máximo de precipitación de la estación más seca, siendo este de 0,4 mm. Por el contrario, las máximas precipitaciones ocurren entre los meses de otoño-invierno, siendo diciembre el mes en el que se alcanza el máximo con una total de 72,8 mm. Cabe destacar también las precipitaciones registradas en el mes de abril que son las precipitaciones más elevadas tras las de enero, con una total de 57,2 mm.

Respecto a los datos de pluviometría de media estacional, los porcentajes son:

Tabla 8-4. Porcentaje de pluviometría según la estación de año.

ESTACIÓN	PORCENTAJE DE PRECIPITACIÓN (%)
Invierno	22,48
Primavera	24,26
Verano	2,95
Otoño	50,29

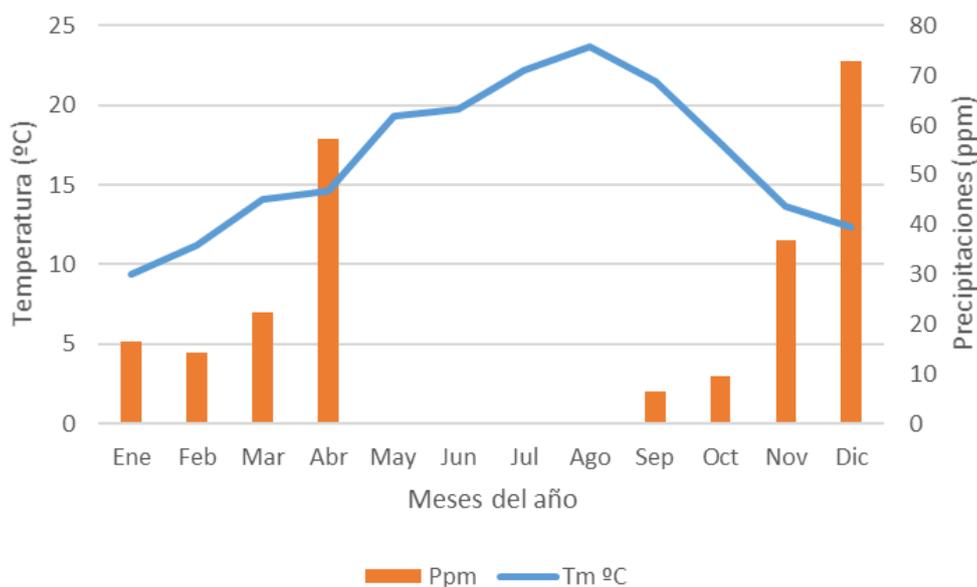


Figura 8-2. Distribución de temperaturas y precipitaciones medias mensuales.

En cuanto al viento de la zona, éste depende en gran medida de la topografía local además de otros factores. La velocidad promedio del viento por hora en Palos de la Frontera tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año.

La parte más ventosa del año dura alrededor de 8 meses, ya que está comprendida entre los meses de octubre hasta mayo, con una velocidad promedio de 15,8 km/h. Destacándose el 15 de diciembre por ser el día en el que el viento alcanza su máxima velocidad, siendo esta de 18 km/h.

Por el contrario, el tiempo en el que el viento se encuentra más calmado es de aproximadamente 4 meses, siendo el 30 de agosto el día donde la velocidad media del viento es de 13,5 km/h.

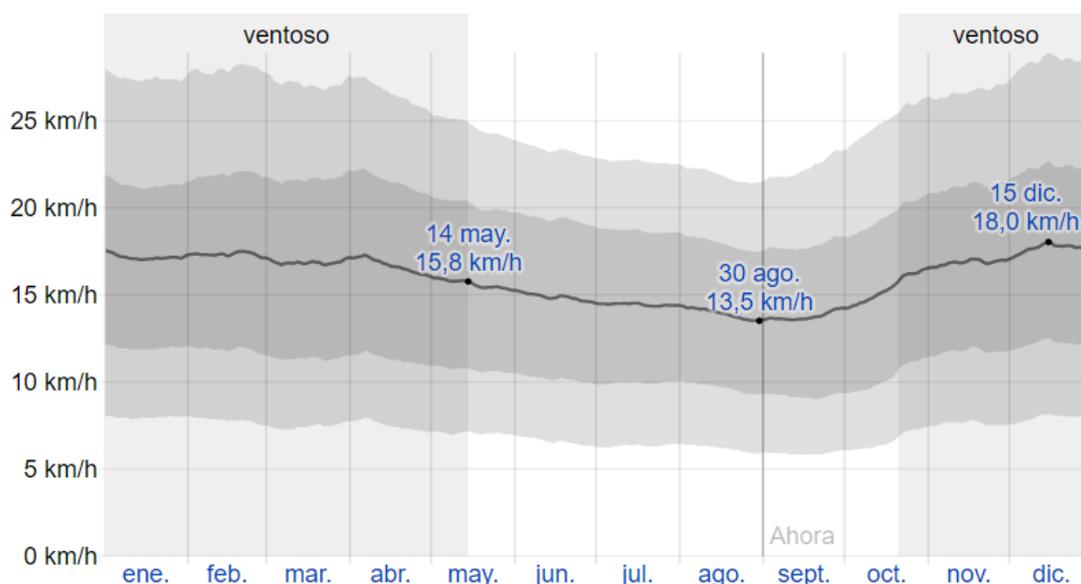


Figura 8-3. Velocidad promedio del viento durante el año 2019 [14].

Tabla 8-5. Porcentaje de humedad media relativa a lo largo del año 2019.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Hm	79	74,8	69,4	74,2	64,3	64,7	70,2	70	72,2	77,2	83,4	83,4

Otro dato importante a tener en cuenta es la humedad media de la zona. Como se observa en la tabla el periodo en el cual la humedad es máxima es entre noviembre y diciembre, alcanzándose un máximo de 83,4%. Por otro lado, los meses en los cuales se alcanza el mínimo porcentaje de humedad relativa son mayo y junio, con un 64,3% y un 64,7%, respectivamente. El resto del año el porcentaje de humedad se matienen constante en torno a 74%.

En concreto el 30 de marzo de 2020, día que se va a tomar como referencia para las modelizaciones de los distintos accidentes, presenta una humedad relativa del 58%.

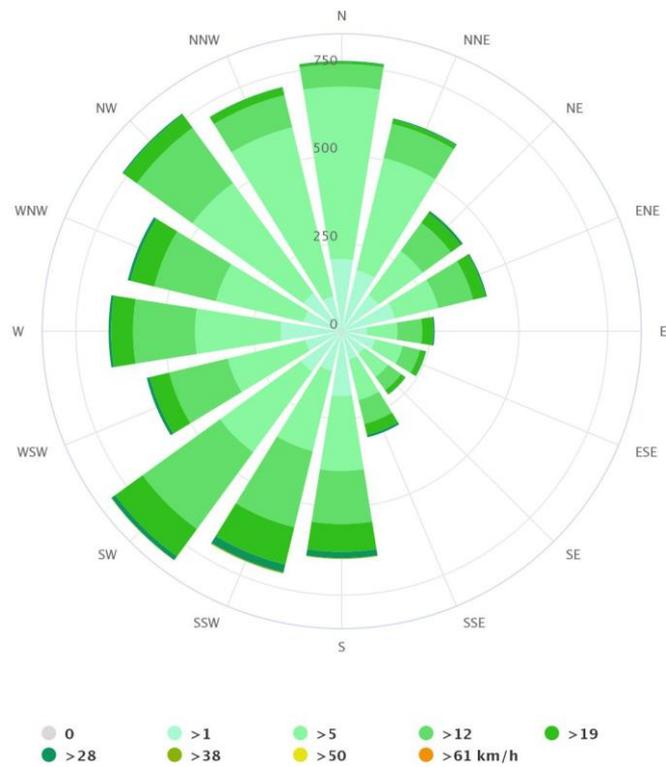


Figura 8-4. Rosa de Vientos. Fuente: [15].

El método de la Rosa de los vientos consiste en un instrumento náutico que muestra la frecuencia de ocurrencia de los vientos. El viento se encuentra sectorizado en relación a cada dirección, quedando, por tanto, 16 sectores: N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW.

Para su obtención es necesario realizar un análisis de vientos con datos estadísticos de intensidad y dirección del viento en el lugar de emplazamiento, medidos durante un periodo de al menos 5 años y como mínimo con 8 repeticiones diarias a intervalos iguales. En caso de que no se posible emplear los datos del emplazamiento en cuestión se podrán tomar estadísticas de zonas cercanas donde haya un observatorio.

Estas observaciones se agrupan en intervalos de intensidad de velocidad, medida en nudos, y para las direcciones se divide cada cuadrante (N, S, E, O) en 4 sectores, quedando finalmente los 16 sectores mencionados anteriormente.

Otro factor relevante a tener en cuenta es la **estabilidad térmica e inversión**. Para entender mejor dichos factores será necesario recurrir a Pasquill.

Pasquill propuso un método que permite determinar los coeficientes de dispersión a partir de una clasificación sencilla de las condiciones atmosféricas, definidas como categorías de estabilidad. Estas categorías son [16]:

- A: Extremadamente inestable.
- B: Moderadamente inestable.
- C: Ligeramente inestable:
- D: Neutra.
- E: Ligeramente estable.
- F: Moderadamente estable.

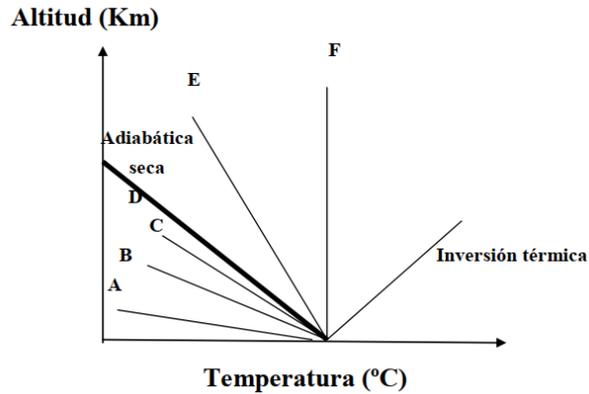


Figura 8-5. Clases de estabildades según Pasquill.

Este método permite que se asocie a cualquier situación atmosférica, alguna de las seis categorías anteriores. Los factores determinantes de cada tipo de estabilidad son:

- La velocidad del viento.
- La nubosidad.
- El flujo neto de radiación que llega a la Tierra. Este afecta al gradiente térmico vertical, a la presencia o ausencia de actividad convectiva y a la dinámica de la capa de mezclado. La ecuación del gradiente térmico vertical es:

$$T_2 = T_1 + \Gamma(z_2 - z_1) = T_1 - 12^{\circ} \frac{C}{km} (z_2 - z_1) \quad (8-1)$$

Los dos primeros parámetros se miden continuamente en una estación meteorológica, la insolación en cambio no.

Más tarde, Gifford caracteriza las clases de estabilidad propuestas por Pasquill como las siguientes:

Tabla 8-6. Tipo de estabildades según Gifford.

Velocidad del viento en superficie (m/seg)	Insolación durante el día			Condiciones nocturnas	
	Fuerte	Moderada	Débil	Nubosidad	
				>4/8	<4/8
<2	A	A-B	B		
2	A-B	B	C	E	F
4	B	B-C	C	D	E
6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

A través de esta tabla se puede concluir con que una estratificación neutral cuando el flujo neto de radiación es cero, bajo condiciones de densa nubosidad, ya sea de día o de noche, sin tener en cuenta la velocidad del viento, se obtiene una estabilidad de tipo D. Una inversión térmica durante la noche, dará lugar a una pobre dispersión del contaminante bajo las condiciones de la estabilidad E o F. Las estabildades de tipo A, B y C representan las condiciones diurnas con grandes cantidades de radiación en la Tierra. Con bajas velocidades de vientos y fuerte radiación (estabilidad tipo A), se produce una intensa actividad convectiva y fuerte mezclado. Esta última genera una capa de inversión elevada. Flujos más bajos de radiación o velocidades de vientos más

elevadas, dan lugar a una estabilidad de tipo B, o con una actividad ligeramente convectiva a una estabilidad tipo C [16].

8.3. Historia de la Planta de Almacenamiento y Regasificación de Huelva

El 14 de junio de 1988, se produjo la primera descarga de gas natural licuado (GNL), efectuado por el buque denominado “Isabella”, con gas procedente de Argelia.

En su primera fase la planta constaba de un tanque de 60.000 m³ de capacidad y una capacidad de emisión de 100.000 m³/h. Esta capacidad era suficiente para suministrar gas a Huelva, Palos de la Frontera y sus zonas industriales, así como Sevilla, con la que quedó unida mediante la construcción de un gasoducto de 20”.

En proyectos posteriores, la planta ha ido incrementando su capacidad de almacenamiento de GNL gracias a la implantación de nuevos tanques. En 1992 entró en servicio el segundo, de 100.000 m³, en 2004, el tercer tanque de 150.000 m³ y en 2006 el cuarto de 159.500 m³. Finalmente, en noviembre de 2010 se puso en marcha el quinto tanque, de una capacidad de 150.000 m³.

Como consecuencia del aumento gradual de la capacidad de almacenamiento de la planta, se ha producido también un incremento en la capacidad de emisión de gas natural. Así, en 1992 la capacidad de vaporización se elevaba a 450.000 m³/h, y en 2004, hasta 900.000 m³/h. En marzo de 2007, la emisión alcanzó los 1.350.000 m³/h [17].

8.4. Información sobre el establecimiento

8.4.1. Identificación del establecimiento

La información más relevante se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 8-7. Datos de identificación del establecimiento [17].

Nombre de la empresa	Planta de Almacenamiento y Regasificación de Huelva
Razón social	ENAGÁS Transporte S.A.U.
CIF	A86484334
Dirección de la instalación industrial	Polígono Industrial Nuevo Puerto. Torre Arenillas 21810. Palos de la Frontera, Huelva.
Actividad desarrollada	Almacenamiento, regasificación y expedición de gas natural licuado
Número de empleados	72

8.5. Descripción del proceso

En la actualidad, esta planta cuenta con un total de cinco tanques de almacenamiento de gas natural licuado (GNL), con una capacidad de almacenamiento total de 619.500 m³ de GNL.

La principal actividad que es llevada a cabo en dicha planta es la recepción, almacenamiento, regasificación y expedición del GNL. Cada uno de estos procesos se desarrollan a continuación [17].

8.5.1. Recepción del gas natural

Mediante buques metaneros se recibe el GNL en la instalación. La descarga es realizada a través de brazos específicos para líquidos criogénicos. Para que el gas natural se encuentre en estado líquido este debe ser transportado a una temperatura cercana a los 160 grados bajo cero [17].

8.5.2. Almacenamiento

Una vez descargado el GNL de los buques este pasa a los tanques de almacenamiento. Existen cinco tanques con la siguiente enumeración:

Tabla 8-8. Enumeración y capacidad de los tanques [17].

Tanque	Capacidad de almacenamiento
FB-101	60.000 m ³
FB-111	100.000 m ³
FB-121	150.000 m ³
FB-131	150.000 m ³
FB-141	150.000 m ³

El GNL es almacenado en el interior de cada tanque a una temperatura de -161°C. La presión en el interior de los depósitos se controla a través de los vapores que se generan durante la evaporación del gas natural.

Dichos vapores son recuperados en unos compresores para pasarlos a un relicuador donde son mezclados con una corriente de GNL procedente de las bombas primarias. Esta mezcla vuelve a pasar al estado líquido y es impulsada hacia unos vaporizadores.

En el caso de que estos vapores no sean imprescindibles, estos son enviados a una antorcha donde se queman de forma controlada.

8.5.3. Regasificación

El gas natural licuado presente en los tanques es transformado a gas mediante vaporizadores. Estos vaporizadores realizan la regasificación empleando agua de mar o combustión sumergida.

En el primer caso, se emplea agua de mar para vaporizar hasta la temperatura ambiente el GNL circulante, para lo cual es necesario emplear un intercambiador de calor a contra corriente. En el segundo, dentro de un baño de agua calentado mediante un quemador de gas, se introduce un serpentín por el interior del cual circula el GNL, produciéndose su vaporización hasta temperatura ambiente.

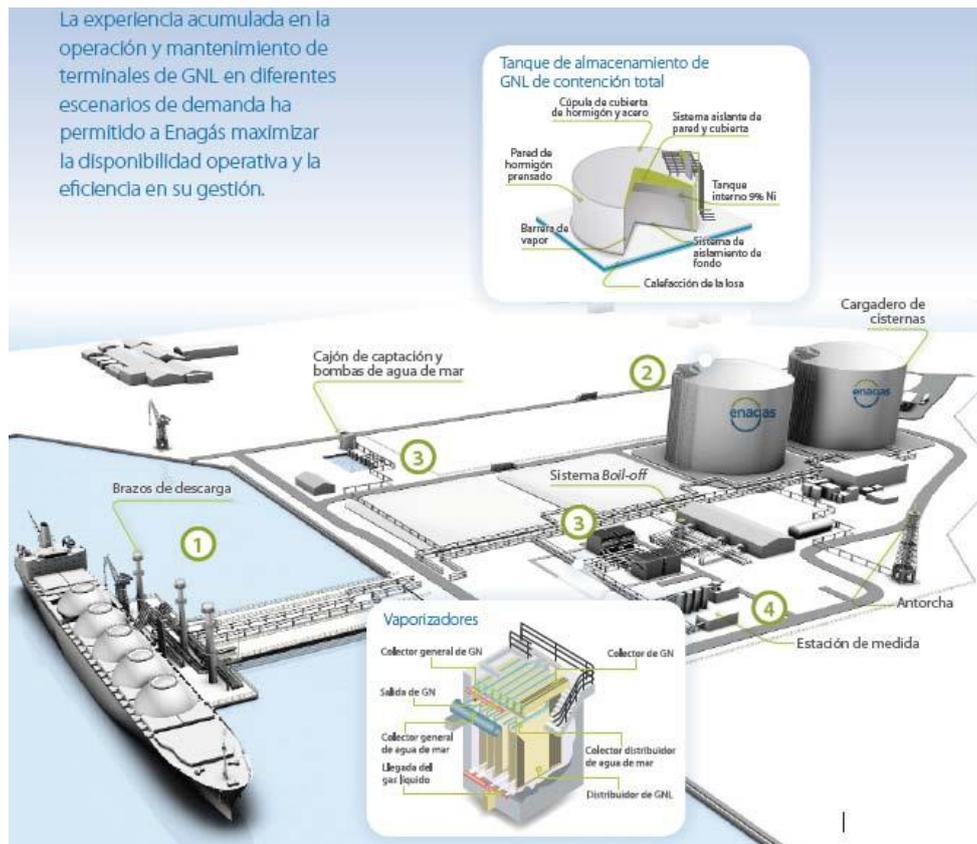


Figura 8-6. Proceso de regasificación del gas natural licuado. Fuente: [17].

8.5.4. Expedición

El gas natural producido es medido y odorizado² en una estación de medición. El proceso del gas natural regasificado de la planta finaliza con la incorporación del mismo a la red básica de gas.

Otra forma de expedir el GNL es mediante el empleo de camiones cisterna. Esta planta cuenta con tres puestos de carga y con una capacidad total de carga que equivale aproximadamente a 50 camiones cisterna al día.

Además, podemos tener en cuenta el proceso de carga de buques. Este se realiza empleando el gas natural licuado bombeado desde las bombas primarias de los tanques de almacenamiento de la planta, que es enviado por las líneas de descarga hacia el brazo de carga/descarga para ser entregado al buque.

Durante las operaciones de carga y puesta en frío de buques metaneros se genera una gran cantidad de boil-off³ debido al calentamiento del gas natural licuado [17].

² El proceso de **odorización** es realizado mediante la incorporación al gas natural de THT (Tetrahidrotiofeno)

³ **Biol-off**: con frecuencia el GNL se evapora al someterse a temperaturas superiores a su punto de ebullición generando un boil-off.

9. SOFTWARES EMPLEADOS

9.1. ALOHA

ALOHA versión 5.4.7.0, es una aplicación de software independiente desarrollada para sistemas como Windows y Macintosh. Fue desarrollado y cuenta con el apoyo de la División de Respuesta a Emergencias, una división que pertenece a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica en colaboración con la Oficina de Gestión de Emergencias de la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

ALOHA está diseñado para producir resultados razonables y de forma inmediata que puedan ser empleados por el personal durante una emergencia. Por lo tanto, los cálculos de ALOHA representan un compromiso entre precisión y velocidad. Muchos de las características de ALOHA se desarrollaron para ayudar rápidamente al personal durante el accidente.

ALOHA está diseñado para ser fácil de usar, de forma que se pueda emplear en situaciones de elevada presión. A lo largo de la simulación, aparecen una serie de diálogos en los cuales se son solicitados al usuario que ingresen la información sobre el posible escenario (por ejemplo, químicos, condiciones climáticas y el tipo de accidente). Para cada cuadro de diálogo existe la posibilidad de emplear ayuda detallada. La información del escenario y los resultados del cálculo son resumidos en una ventana imprimible de texto. Una vez que los cálculos de ALOHA están completos, los usuarios pueden elegir que se muestre un gráfico de salida.

Uno de los aspectos más importantes de ALOHA es la estimación de la zona de amenaza. Una zona de amenaza en un área donde existe un determinando peligro (como toxicidad o radiación térmica) y además se ha excedido el nivel de preocupación (LOC). ALOHA muestra hasta tres amenazas cada una de ellas con un color específico. La zona de amenaza roja (zona crítica) representa el peor peligro.

El software está diseñado para proporcionar un límite superior cercano a las distancias de amenaza asociadas con derrames de sustancias químicas. Donde sea inevitable la incertidumbre, ALOHA sobreestimaré la tasa en lugar de subestimar las distancias de amenaza.

9.2. MARPLOT

MARPLOT_client.exe, es un programa de mapeo del paquete de software CAMEO, que se emplea ampliamente para planificar y responder a emergencias químicas.

Contiene una interfaz SIG muy fácil de usar que permite agregar objetos a un mapa, así como ver y editar datos asociados con los objetos. Puede elegir entre varias imágenes de mapa base de fondo y puede personalizar aún más su mapa de anotaciones y capas en línea de Web Mapping Services. Se puede emplear de manera interactiva con los programas de la suite CAMEO para mostrar las estimaciones de la zona de amenaza de ALOHA en el mapa o para vincular objetos del mapa con registros de la base de datos en CAMEO. También se pueden obtener datos estimados de la población dentro de un área.

10. POSIBLES ACCIDENTES

10.1. Características generales del compuesto originador del accidente

En este capítulo, se pretende simular los efectos provocados como consecuencia de un accidente (nube tóxica, incendio o BLEVE) en un tanque que contiene gas natural licuado (en estado líquido). Por tanto, el gas liberado a la atmósfera es gas natural, cuya composición es principalmente metano (CH_4 , en torno al 90%) y acompañado mayormente por etano, propano y butano.

El metano es un gas incoloro e inodoro además de un líquido bajo presión. Normalmente es empleado como fuente de luz y combustible. Debido a su composición, lleva aparejado un riesgo inherente al carácter extremadamente inflamable del gas natural [18].

Los efectos sobre la salud pueden producirse inmediatamente o poco después de la exposición al metano:

- El contacto de la piel con el metano licuado puede causar congelación grave.
- Los niveles muy altos de metano pueden disminuir la cantidad de oxígeno en el aire provocando asfixia, con síntomas de dolor de cabeza, mareo, debilidad, náuseas, vómitos, pérdida de la coordinación y del juicio, aumento de la frecuencia respiratoria y pérdida del conocimiento e incluso la muerte.

El metano es un gas inflamable por lo que existe riesgo de que durante una fuga se produzca un incendio. Además, si este compuesto se encuentra en regiones confinadas este presenta un elevado riesgo de explosión. En el caso del gas natural licuado, éste flota sobre el agua y comienza a hervir, produciéndose una nube de vapor inflamable. Al incendiarse, este compuesto genera una gran cantidad de gases tóxicos y provoca que equipos o recipientes contiguos puedan explotar (efecto dominó).

Cuando se produce una fuga de GNL se forma una nube de color blanco, debido a la baja temperatura a la cual se encontraba almacenado que provoca la condensación de la humedad del aire circulante. Los vapores desprendidos por el líquido son muy fríos lo que hace que se comporte como un gas pesado, acumulándose en las partes bajas del suelo, hasta que se calienta. En ese momento el gas se hace más ligero que el aire ambiente y comienza a ascender para dispersarse en la dirección del viento dominante.

Si la mezcla de vapores del gas natural en el aire se encuentra en concentración en volumen entre el 5% y el 15%, y alcanza una fuente de ignición, la nube y el charco de GNL se inflamarán. Si dicha ignición de la nube de gas no es inmediata y se retarda en el tiempo, se puede producir una deflagración de la nube de gas inflamable que a su vez generaría una sobrepresión. Dicha deflagración es conocida como UVCE si se da en un espacio abierto o VCE si se produce en espacio cerrado.

A continuación, se muestran las propiedades físicas del metano.

Tabla 10-1. Propiedades físicas del metano [18].

Umbral de olor	Inodoro
Punto de inflamación	-188°C
Temperatura de autoignición	537°C
Densidad de vapor	0,55 (aire = 1)
Presión de vapor	>760 mmHg a 20°C
Solubilidad en agua	Muy poco soluble
Punto de ebullición	-162°C

Punto de congelación	-183°C
Temperatura crítica	-82,5°C
Peso molecular	16,04

Existen numerosas fuentes de emisión del metano, dividiéndose estos en:

- Focos de emisión antropogénicos: dentro de esta categoría podemos destacar los vertederos que suponen la mayor fuente de emisión con un 33,9% del total; la fermentación entérica con un 29,7%; el estiércol con un 17,9%; petróleo y gas natural con un 6%; minería del carbón con una 4% y finalmente el 2,6% producido en el tratamiento de las aguas residuales.
- Focos de emisión de origen natural: dentro de los focos de origen natural destacamos la descomposición de residuos orgánicos con un 30%; los pantanos con un 23%; la extracción de combustible fósiles con un 20% (de forma tradicional el metano procedente de los yacimientos de petróleo se quemaba y emitía directamente a la atmósfera. Hoy día se emplea como gas natural) y finalmente los procesos en la digestión y defecación de los animales con un 17% [19].

10.2. Modelización de una nube tóxica.

Para la simulación de este accidente tendremos en cuenta las condiciones atmosféricas de la zona, así como las direcciones de viento más predominantes y aquellas direcciones en las que se alcanza la población. Por ello, los distintos accidentes se simularán teniendo en cuenta las siguientes direcciones de viento: SW, NW y NNE. Se han seleccionado estas direcciones de viento puesto que es donde se encuentra la población más cercana, además de figuras bajo protección ambiental (NW y NNE) y por consiguiente donde existe un mayor riesgo. Por el contrario, la dirección SW ha sido seleccionada puesto que es la dirección predominante si tenemos en cuenta la rosa de los vientos de la región.

El accidente se produce debido a una leve rotura del tanque de almacenamiento del GNL que contiene en dicho momento 60.000 m³. Al comenzar a fugar, y debido a las características de la sustancia química almacenada, el GNL pasa a estado gaseoso dando lugar a la formación de una nube tóxica.

10.2.1. Modelización de una nube tóxica: SW

Para poder llevar a cabo la simulación del accidente, el programa ALOHA solicita una serie de datos que son: localización y fecha, sustancia o producto implicado en el accidente, datos atmosféricos, características del tanque de almacenamiento, datos sobre la fuga tóxica y cálculo de las zonas de amenaza.

A continuación, se muestran los detalles:

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH₄).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: SW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Mar abierto.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad E (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la fuga tóxica:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.

Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.

Duración de la fuga: 1 hora.

Caudal máximo fugado: 687 kg/min.

Cantidad total fugada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 50 ppm.
Distancia: Más de 10 km.
- Zona de intervención: 300 ppm.
Distancia: 4,5 km.
- Concentración de 1000 ppm.
Distancia: 2,4 m.

Representación gráfica de las zonas:

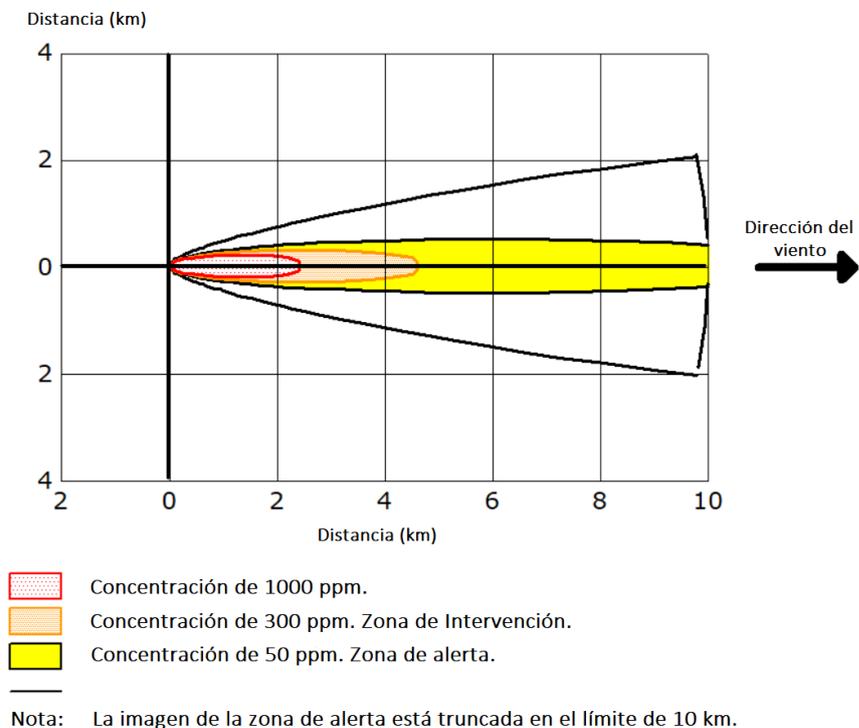


Figura 10-1. Representación gráfica de las zonas de planificación para una nube tóxica de metano.

El siguiente diagrama está relacionado con la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

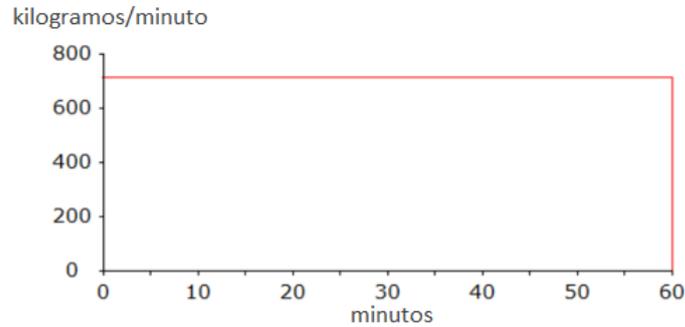


Figura 10-2. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, si se representa las zonas de amenaza sobre el mapa a través del software MARPLOT se obtiene lo siguiente:

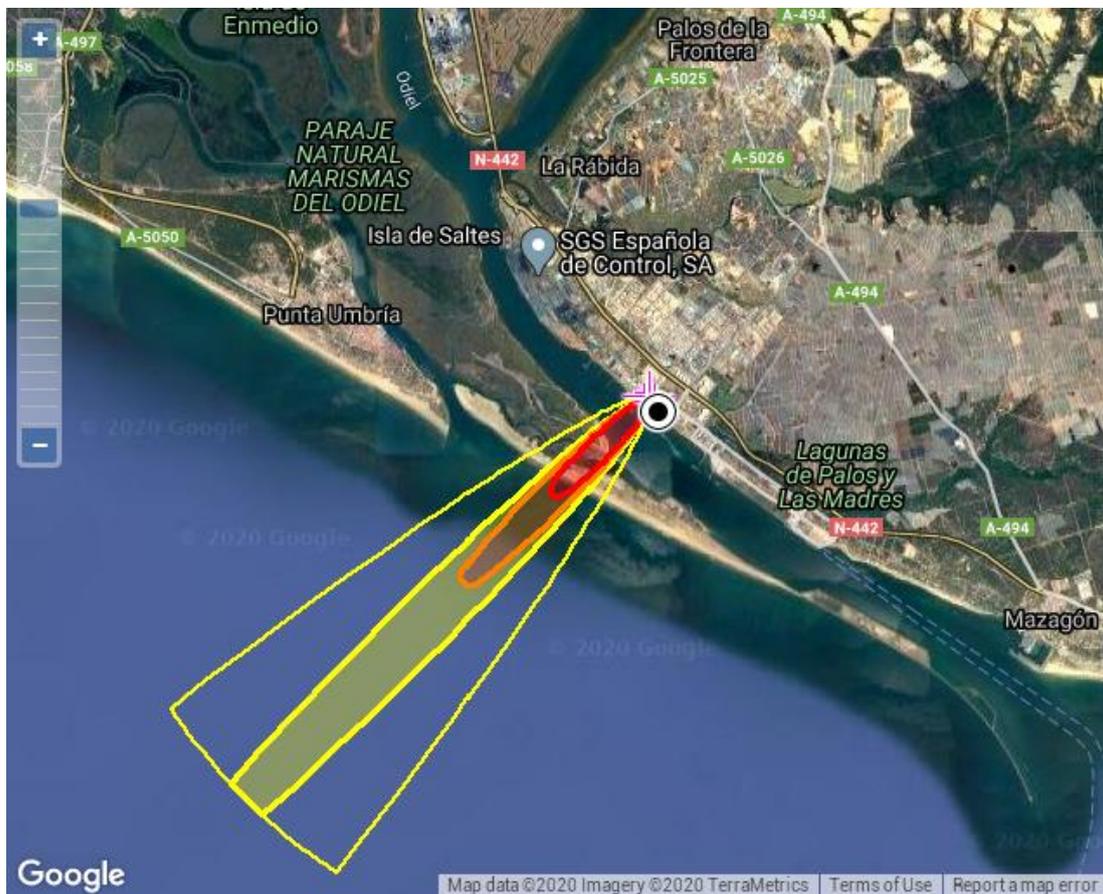


Figura 10-3. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

El objetivo de Marplot es superponer gráficamente las zonas de amenaza de ALOHA sobre una imagen satelital del área de interés. Esta herramienta es muy útil en el manejo de una emergencia y proporciona una imagen muy intuitiva de las áreas a evacuar.

Se puede observar que las zonas con nivel tres y dos cubren un área que es parte de la instalación en sí, además de alcanzar una sección del mar. Las personas que se encuentre dentro

de estas áreas podrían sufrir enfermedades graves. El área que se sitúa bajo la zona de alerta cubre principalmente el mar.

10.2.2. Modelización de una nube tóxica: NW

Los datos solicitados por el programa son:

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH₄).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Urbano o forestal.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad tipo C (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la fuga tóxica:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.

Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.

Duración de la fuga: 1 hora.

Caudal máximo fugado: 687 kg/min.

Cantidad total fugada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 50 ppm.
Distancia: 3,2 km.
- Zona de intervención: 300 ppm.
Distancia: 1,2 km.
- Zona crítica: 1000 ppm.
Distancia: 575 m.

Representación gráfica de las zonas:

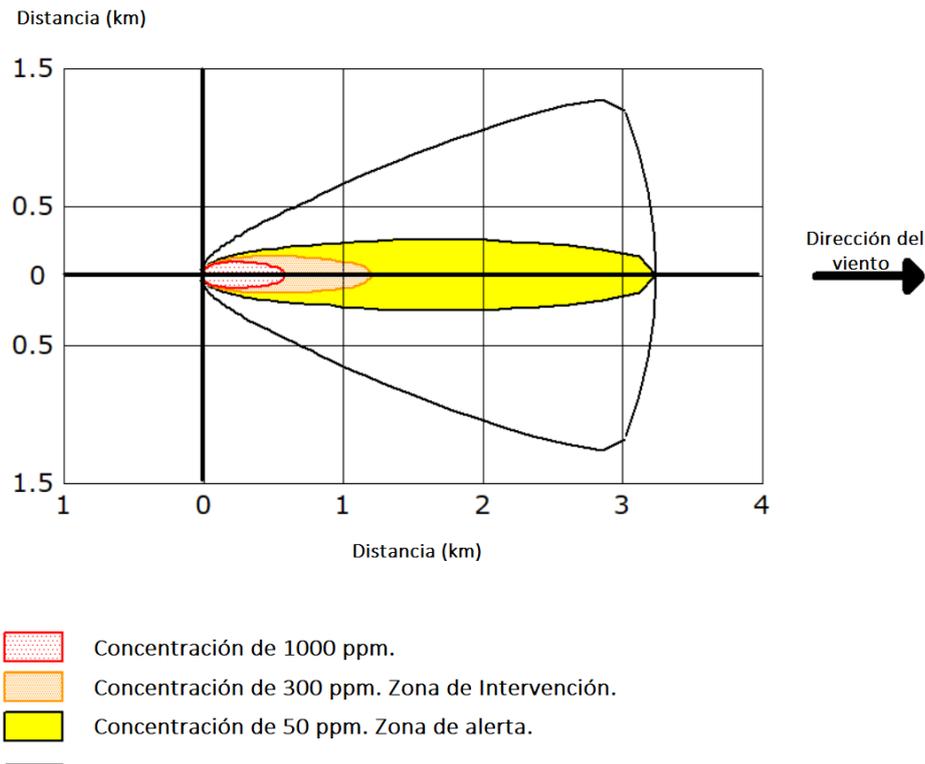


Figura 10-4. Representación gráfica de las zonas de planificación para una nube tóxica de metano.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

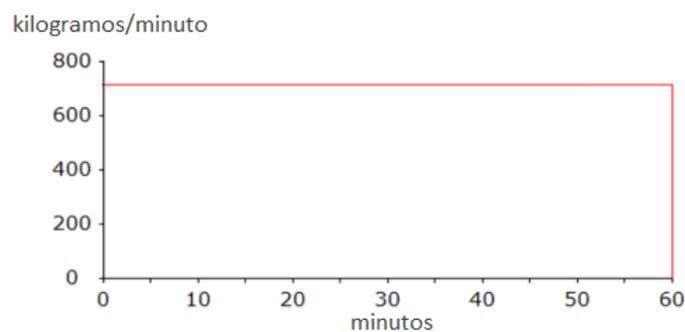


Figura 10-5. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Por último, se ha representado las distintas zonas de amenaza que ALOHA ha arrojado sobre el software MARPLOT, con el objetivo de representar dichas zonas sobre una imagen satelital.



Figura 10-6. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-6., las zonas con nivel tres y dos cubren tanto la propia instalación como aquellas que se sitúan al NW del tanque objeto de análisis. Las personas que se encuentre dentro de estas áreas podrían sufrir enfermedades graves. En cuanto a la zona de alerta, esta cubre un área en el que se encuentran situadas varias instalaciones industriales, más concretamente su límite alcanza hasta la instalación SGS Española de Control, S.A.

10.2.3. Modelización de una nube tóxica: NNE

Los datos solicitados por el programa son:

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH_4).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NNE, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Urbano o forestal.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad tipo C (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m^3 .

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la fuga tóxica:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.
Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.
Duración de la fuga: 1 hora.
Caudal máximo fugado: 687 kg/min.
Cantidad total fugada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 50 ppm.
Distancia: 3,2 km.
- Zona de intervención: 300 ppm.
Distancia: 1,2 km.
- Zona crítica: 1000 ppm.
Distancia: 575 m.

Representación gráfica de las zonas:

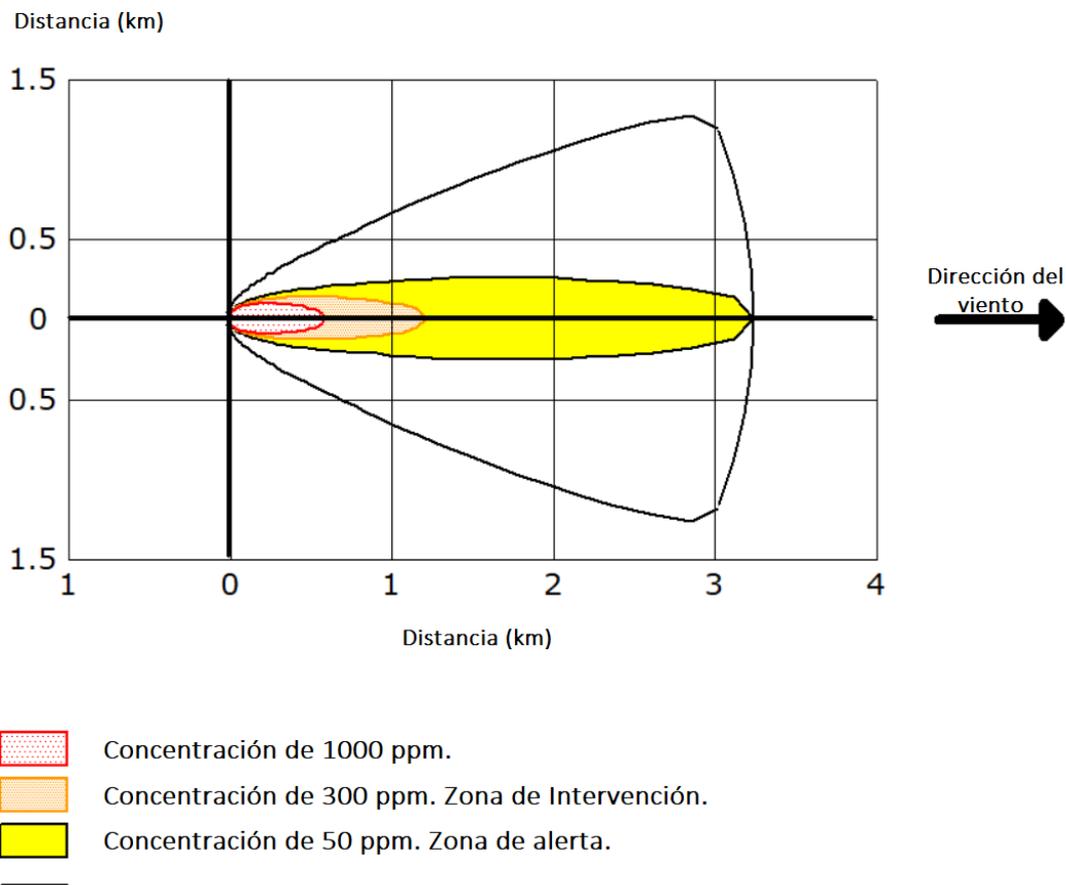


Figura 10-7. Representación gráfica de las zonas de planificación para una nube tóxica de metano.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

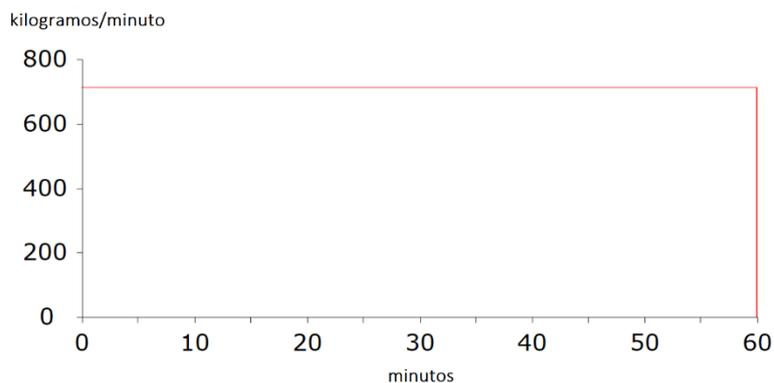


Figura 10-8. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Por último, se muestra una representación de las distintas zonas de planificación sobre la instalación, para la cual MARPLOT nos ha arrojado la siguiente imagen satelital.



Figura 10-9. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-9., las zonas con nivel tres y dos cubren tanto la propia instalación como aquellas que se sitúan al NNE del tanque objeto de análisis. Las personas que se encuentre dentro de estas áreas podrían sufrir enfermedades graves. En cuanto a la zona de alerta, esta cubre un toda el área al NNE del tanque, afectando a las instalaciones que se encuentren en dicha ubicación.

10.2.4. Prevención y protección frente a una fuga de gas metano

En este apartado se van a desarrollar unas ideas básicas de prevención y protección frente a una fuga de gas metano.

10.2.4.1. Ventilación

Una forma de prevenir intoxicaciones del personal por inhalación viene dada por la ventilación de los recintos de trabajo [1].

10.2.4.2. Equipo de protección individual (EPI)

Para evitar daños graves en la salud de los trabajadores es necesario que estos cuenten con una indumentaria apropiada en la que destacan [2]:

- **Mascarillas respiratorias con filtro:** constan de un adaptador facial que aísla (total o parcial) la nariz, boca, ojos y un filtro, a través del cual el aire se canaliza por una válvula antirretorno, cuya función es la eliminación del contaminante. A su vez, el aire respirado es expulsado por una válvula de exhalación. Es de vital importancia que esta sea adaptable a la cara del usuario y el grado de hermeticidad de las válvulas sea el correcto.
- **Equipos autónomos:** estos equipos se caracterizan por aportar el aire a través de un cilindro. El inconveniente es que requieren un chequeo constante de la presión del cilindro. A tal efecto, algunos llevan incorporada una alarma audible a baja presión del cilindro.
- **Complementos:** entre los que destacan las gafas, cinturones de seguridad, calzado especial de protección, guantes, botellas de aire u oxígeno a presión, ducha de emergencia, fuentes lavaojos, equipos de seguridad contra incendios, etc., conforman parte del contingente material de protección, individual y colectiva que, a disposición del personal especializado, resulta preceptivo disponer en las instalaciones de almacenamiento de este tipo, ubicado en armarios y lugares idóneos, fuera de las zonas peligrosas pero inmediatas a las mismas.

10.2.4.3. Higiene personal

Es de vital importancia la implantación y facilitación al personal sometido a riesgos de toxicidad el lavado de manos antes de realizar su turno de descanso y comidas, así como que se duche y cambie de ropa al final de su jornada laboral. No es conveniente el uso de lentillas en el puesto de trabajo donde existan riesgos de toxicidad. Además, resulta bastante útil la implantación de sistemas de información y jornadas al respecto, en relación con la indumentaria y los hábitos de higiene del personal [2].

10.2.4.4. Muestreos, análisis y alarmas en el entorno de trabajo

Otro aspecto importante es la existencia de muestreos, análisis y alarmas en el entorno de trabajo. Existen alrededor de 18 NTP sobre muestreo y tres sobre métodos analíticos, así como información sobre tóxicos específicos.

10.2.4.5. Primeros auxilios e información adecuada al personal sanitario en caso de accidente

Es de primera prioridad y de urgencia actuar sobre la respiración y actividad cardiaca del paciente, ya que el tiempo disponible para salvarle la vida es de 3 a 8 minutos, según los casos.

Además, debe actuarse para poner al paciente en presencia del personal sanitario oportuno. Resulta de vital importancia implicar bien a los trabajadores sobre los antecedentes y circunstancias (sustancias implicadas, tiempo de exposición, etc.) del accidente [2].

10.2.4.6. Detección y control de las fugas según la NTP 338

Al tratarse de un tanque que se encuentra al aire libre, puede resultar suficiente el empleo de sistemas de medición manual para su aplicación de forma periódica en aquellos lugares susceptibles de emisión. Además, es beneficioso disponer de un sistema de detección sobre la dirección y velocidad del viento en el ámbito físico en el que pueden producirse las emisiones. Con ello será factible predecir, ante la puesta en marcha de un plan de emergencias, la dispersión del producto tóxico en el aire, informando de esta forma al personal que pueda verse afectado.

En cuanto a la minimización de la fuga, es importante disponer de los medios adecuados para la obturación de las fugas empleando cuñas de madera dura y afilada introducida a presión en el agujero causante de la fuga, láminas de caucho presionadas sobre superficies convexas, masillas a base de “mastic” o cemento idóneo de fraguado rápido, etc. hasta caperuzas o envolventes que

pueden ser presionadas sobre el entorno en el que se produce la fuga logrando así su estanqueidad. Estos medios deben localizarse y señalarse en un lugar contiguo a la zona de almacenamiento. Además, es necesario que un determinado personal de la instalación esté debidamente especializado en el uso y empleo de tales equipos y medios para la obstrucción de fugas [20].

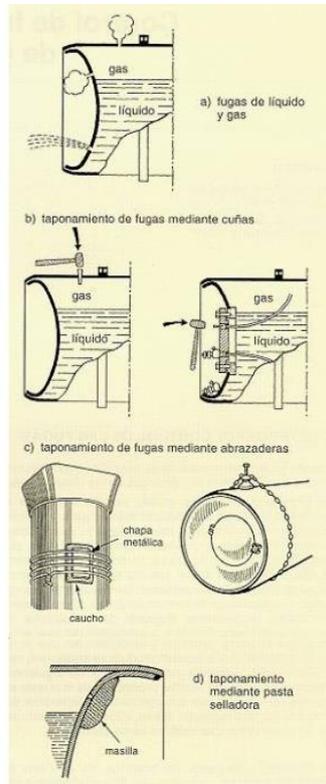


Figura 10-10. Obstrucción provisional de fugas en fase gaseosa [21].

En el caso en que se haya producido la fuga, se pueden emplear cortinas de agua para la dilución de los vapores con aire reduciendo de esta forma la severidad de los efectos de la emisión. Se pueden emplear cortinas de agua ya que son las más efectivas para vapores que son insolubles en agua (caso del metano). La nube puede ser diluida por la acción de la cortina, pero los efectos de ésta, a medida que el vapor se va alejando de su fuente de emisión, se ven reducidos dado que:

- El vapor es dispersado al no variar la densidad del flujo de vapor.
- El aire ocluido en las cortinas de agua acaba contaminado con el vapor de la nube.

La cantidad de aire ocluido en la cortina de agua debe determinarse al diseñar el efecto dilución de la cortina de agua (para ello, se debe definir un coeficiente entre la cantidad de aire arrastrado y la cantidad de agua pulverizada).

En cuanto al sistema de accionamiento de dichas cortinas de agua, suele ser manual, aunque también pueden ser automáticos. Además, debe tenerse la precaución de que el agua que queda impregnada de la sustancia tóxica sea drenada para su posterior tratamiento.

Por otro lado, al tratarse de una sustancia inflamable, es conveniente proteger frente a radiación térmica, los depósitos contiguos que puedan verse afectados. Estos depósitos podrían protegerse con sistemas rociadores que cumplieren lo especificado para productos inflamables.

10.3. Modelización de una nube tóxica con inversión térmica

En este apartado se van a realizar dos modelizaciones en las cuales se van a tener en cuenta un único accidente: la nube tóxica. El objeto de estas modelizaciones es ver que efecto produce la existencia de una inversión térmica cuando se produce una fuga tóxica.

La altura a la cual se producirá la inversión térmica, teniendo en cuenta que lo más frecuente es que ésta se produzca a una altura de 500 metros, será la altura común (500 metros) y una altura más baja, en la cual se supondrá que la inversión térmica se produce a los 100 metros.

Para llevar a cabo esta modelización, se va a tener en cuenta una única dirección de viento (NW). La consideración de ésta se debe a que, en esta dirección, se encuentra la población más cercana, aunque la probabilidad de ocurrencia de este accidente bajo estas condiciones dadas es baja. Se ha de destacar, además, que la formación de una inversión térmica en dicha dirección de viento a lo largo del año es mínima [22].

10.3.1. Modelización de una nube tóxica con inversión térmica: NW

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH₄).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Urbano o forestal.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad C (con inversión térmica a 500 metros).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la fuga tóxica:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.

Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.

Duración de la fuga: 1 hora.

Caudal máximo fugado: 687 kg/min.

Cantidad total fugada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 50 ppm.

Distancia: 3,2 km.

- Zona de intervención: 300 ppm.
Distancia: 1,2 km.
- Zona crítica: 1000 ppm.
Distancia: 575 m.

Representación gráfica de las zonas:

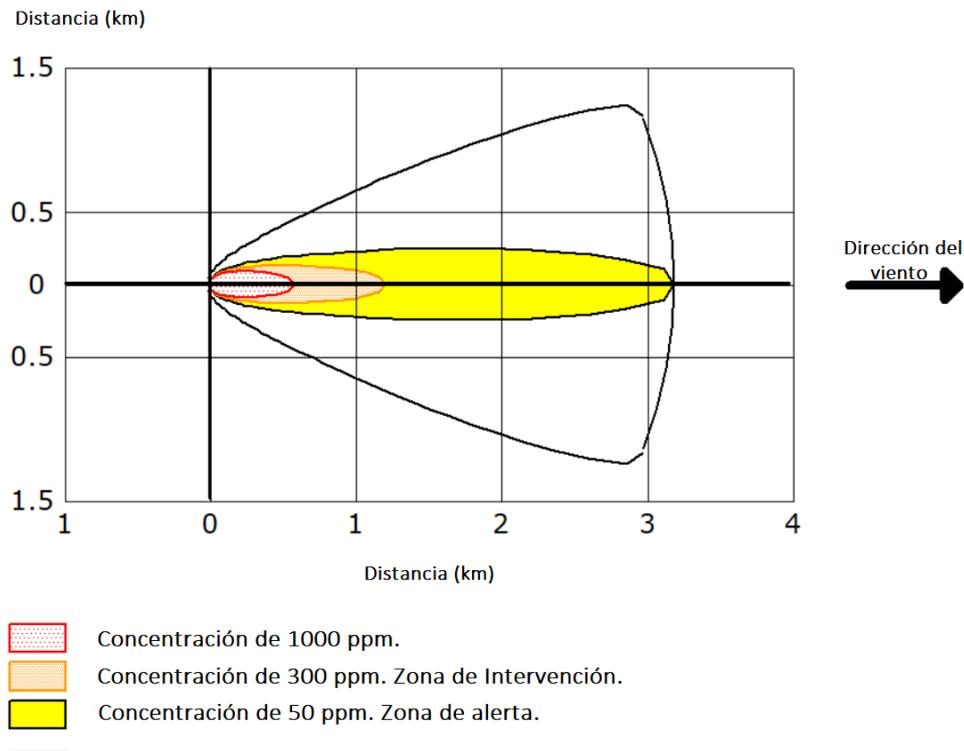


Figura 10-11. Representación gráfica de las zonas de planificación de una nube tóxica con inversión térmica.

Comparando la Figura 10-11 y la Figura 10-4, se puede observar que no existe ninguna variación en cuanto al alcance de las zonas de amenaza, cuando existe una inversión térmica a 500 metros de altura. Por tanto, se puede concluir que los efectos son similares que cuando se produce una nube tóxica sin inversión térmica. Por ello, en el siguiente apartado se va a evaluar este mismo accidente, cuando se produce una inversión térmica a menor altura, más concretamente a 100 metros.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

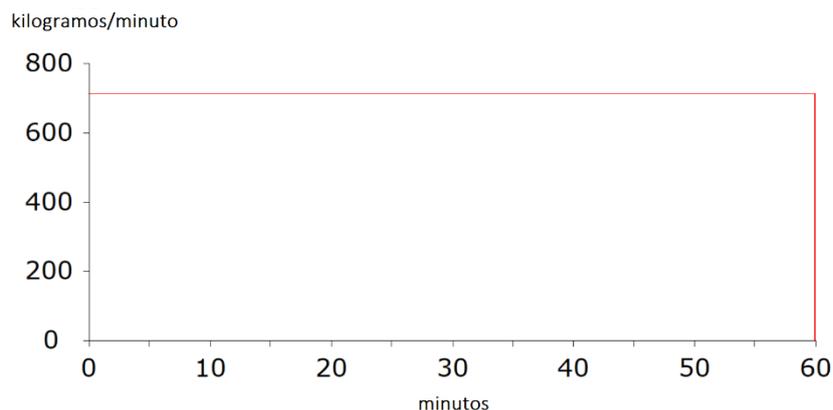


Figura 10-12. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.



Figura 10-13. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-13, y si la comparamos con la Figura 10-6, se puede apreciar que, aunque se produzca una inversión térmica con una altura de 500 metros, ésta no afecta a la fuga tóxica. Por consiguiente, el accidente producido como consecuencia de la fuga tóxica no se verá afectado por dicho factor atmosférico.

Como ya se ha comentado anteriormente, algunas de las medidas de prevención y protección frente a una nube tóxica son:

- Ventilación: evita intoxicación del personal.
- Equipos de protección individual (EPI): evita daños graves sobre la salud de los trabajadores.
- Higiene personal.
- Análisis y alarmas en el entorno de trabajo.
- Detección y control de fugas.

10.3.2. Modelización de una nube tóxica con inversión térmica: NW

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH₄).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Urbano o forestal.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad C (con inversión térmica a 100 metros de altura).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la fuga tóxica:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.

Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.

Duración de la fuga: 1 hora.

Caudal máximo fugado: 687 kg/min.

Cantidad total fugada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 50 ppm.
Distancia: 3,2 km.
- Zona de intervención: 300 ppm.
Distancia: 1,2 km.
- Zona crítica: 1000 ppm.
Distancia: 575 m.

Representación gráfica de las zonas:

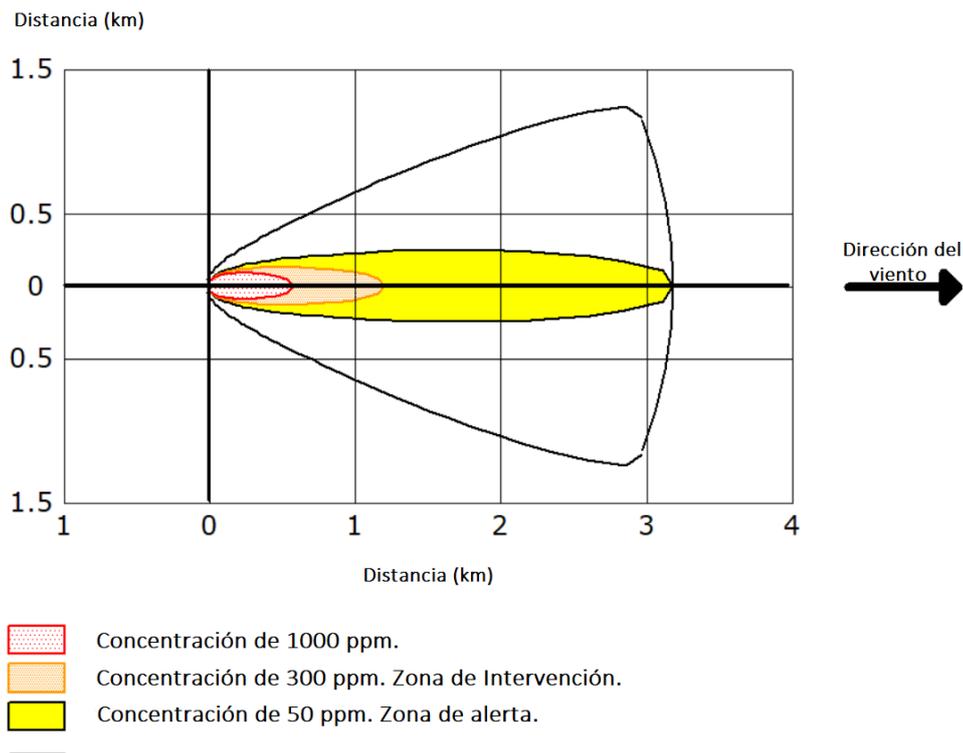


Figura 10-14. Representación gráfica de las zonas de planificación de un Jet Fire con inversión térmica.

Comparando la Figura 10-4, la Figura 10-11 y la Figura 10-14, se puede observar que no existe ninguna variación en cuanto al alcance de las zonas de amenaza, cuando existe una inversión térmica a 100 metros de altura. Por tanto, se puede concluir que los efectos son iguales que cuando se produce una nube tóxica sin inversión térmica o cuando se produce una nube tóxica con inversión térmica a 500 metros.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

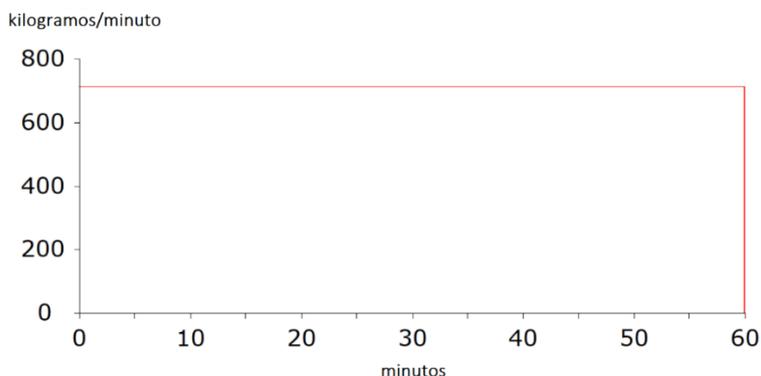


Figura 10-15. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.



Figura 10-16. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

En la Figura 10-16. se observa que las zonas de amenaza alcanzan la misma área que cuando no hay inversión térmica. Por ello, si se produce inversión térmica con una altura de 100 metros, el accidente no se verá afectado por dicho factor atmosférico.

10.4. Modelización de un Jet Fire

Para poder llevar a cabo la simulación de este tipo de accidente, el software ALOHA solicita una serie de datos que son desarrollados a continuación. Al igual que en el caso anterior, se tendrán en cuenta las siguientes direcciones de viento: SW, NW y NNE.

10.4.1. Modelización de un Jet Fire: SW

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH₄).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Campo abierto.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad E (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la llamarada:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.

Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.

Longitud de la llama: 28 m.

Duración del incendio: Aloha lo ha limitado a 1 hora.

Radio del incendio: 687 kg/min.

Cantidad total quemada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 2,0 kW/m², produce quemaduras leves durante una exposición de 60 segundos.

Distancia: 51 m.

- Zona de intervención: 5,0 kW/m², produce quemaduras de segundo grado durante una exposición de 60 segundos.

Distancia: 28 m.

- 10,0 kW/m², potencialmente letal si la exposición alcanza los 60 segundos.

Distancia: 12 m.

Representación gráfica de las zonas:

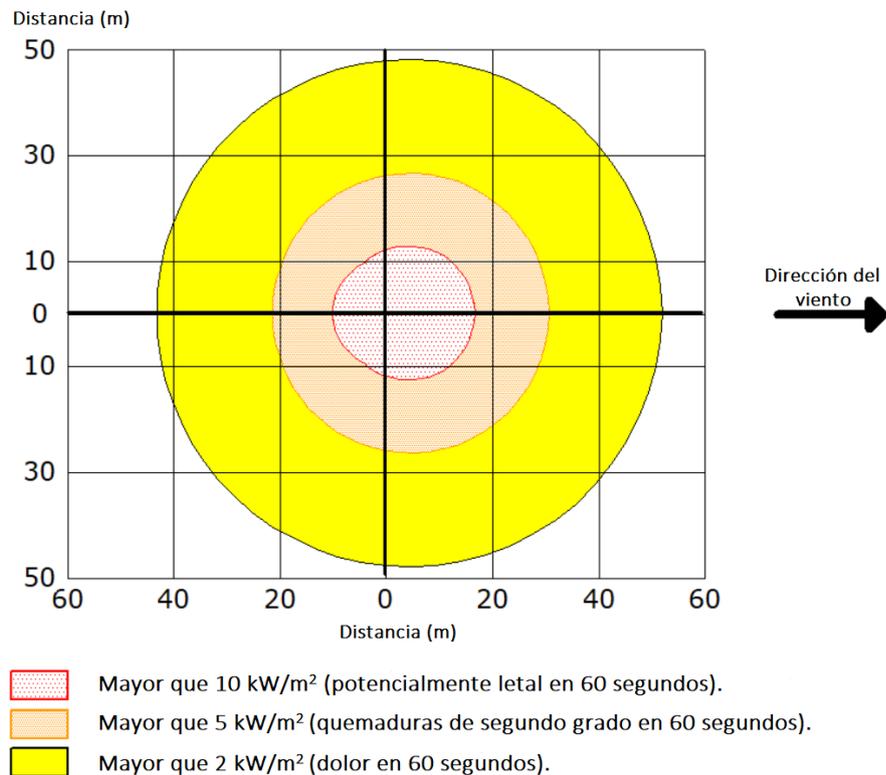


Figura 10-17. Representación gráfica de las zonas de planificación Jet Fire.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

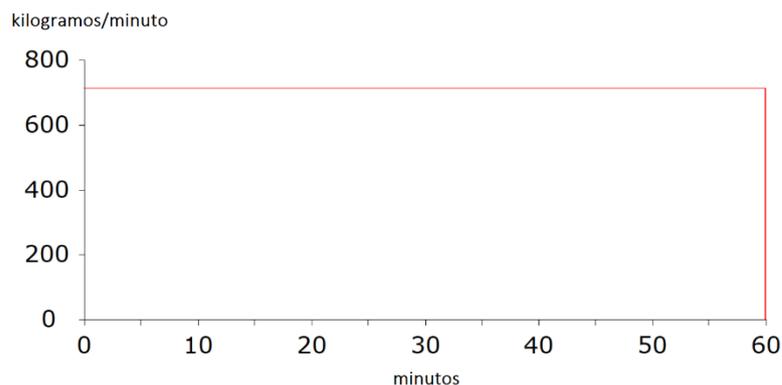


Figura 10-18. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.



Figura 10-19. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-19., la radiación térmica producida por el Jet Fire puede alcanzar el entramado de tuberías que se encuentra en la dirección suroeste. Para evitar que esta radiación alcance a dicho entramado, se pueden emplear algunas de las siguientes medidas [23]:

- **Barreras cortafuegos:** éstas tienen como finalidad confinar el flujo inicial de calor en el área de origen, proporcionando el tiempo suficiente para coordinar y poner en marcha el plan de emergencia.

10.4.2. Modelización de un Jet Fire: NW

- Localización y fecha:** Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.
- Sustancia o producto implicado en el accidente:** Metano (CH_4).
- Datos atmosféricos:**

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Urbano o bosque.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad C (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la llamarada:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.

Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.

Longitud de la llama: 32 m.

Duración del incendio: Aloha lo ha limitado a 1 hora.

Radio del incendio: 687 kg/min.

Cantidad total quemada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 2,0 kW/m², produce quemaduras leves durante una exposición de 60 segundos.

Distancia: 50 m.

- Zona de intervención: 5,0 kW/m², produce quemaduras de segundo grado durante una exposición de 60 segundos.

Distancia: 27 m.

- 10,0 kW/m², potencialmente letal si la exposición alcanza los 60 segundos.

Distancia: 11 m.

Representación gráfica de las zonas:

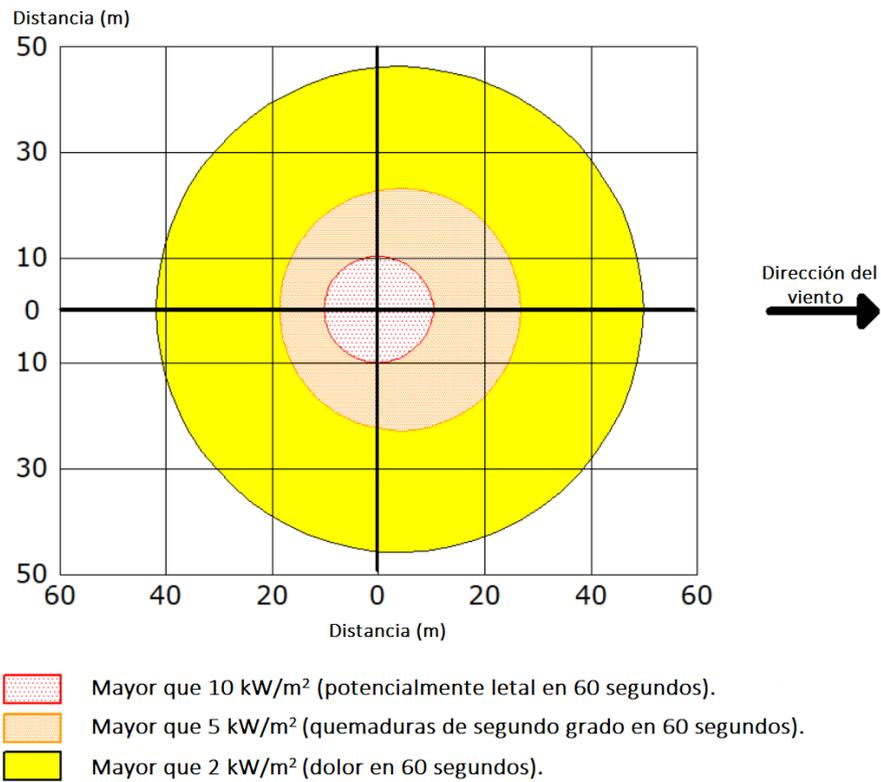


Figura 10-20. Representación gráfica de las zonas de planificación Jet Fire.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

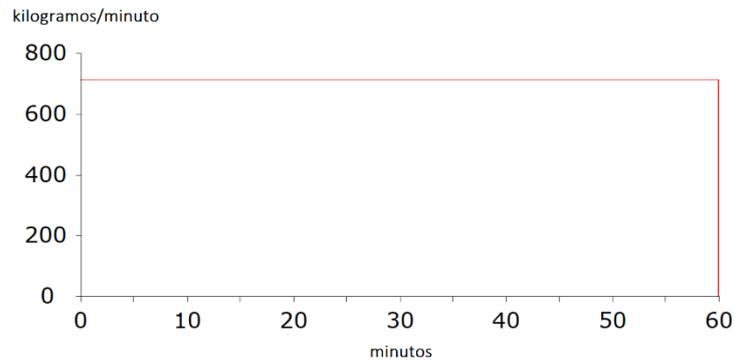


Figura 10-21. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.

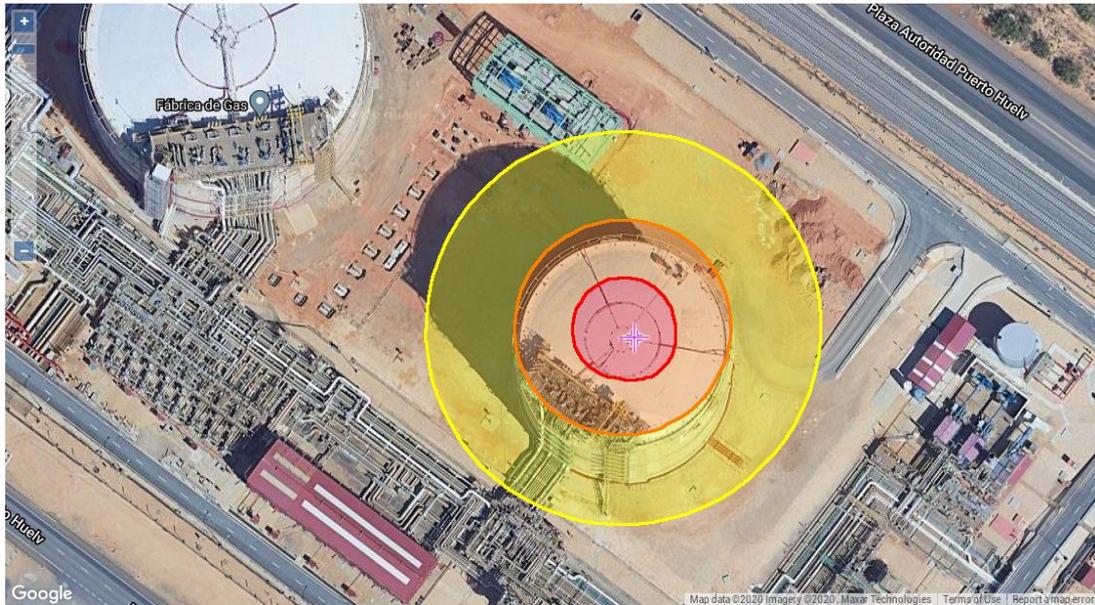


Figura 10-22. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-22., la radiación producida por el Jet Fire no alcanza de forma significativa los equipos contiguos al tanque objeto de estudio. Pero, para una mayor seguridad se puede instalar un cubeto en el tanque evitando así la propagación de la fuga. Este tipo de medidas es muy empleado para el almacenamiento de líquidos inflamables. Su capacidad debe ser la misma que la capacidad del propio tanque.

10.4.3. Modelización de un Jet Fire: NNE

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH_4).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NNE, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Urbano o forestal.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad C (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la llamarada:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.
Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.
Longitud de la llama: 32 m.
Duración del incendio: Aloha lo ha limitado a 1 hora.
Radio del incendio: 687 kg/min.
Cantidad total quemada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 2,0 kW/m², produce quemaduras leves durante una exposición de 60 segundos.
Distancia: 50 m.
- Zona de intervención: 5,0 kW/m², produce quemaduras de segundo grado durante una exposición de 60 segundos.
Distancia: 27 m.
- 10,0 kW/m², potencialmente letal si la exposición alcanza los 60 segundos.
Distancia: 11 m.

Representación gráfica de las zonas:

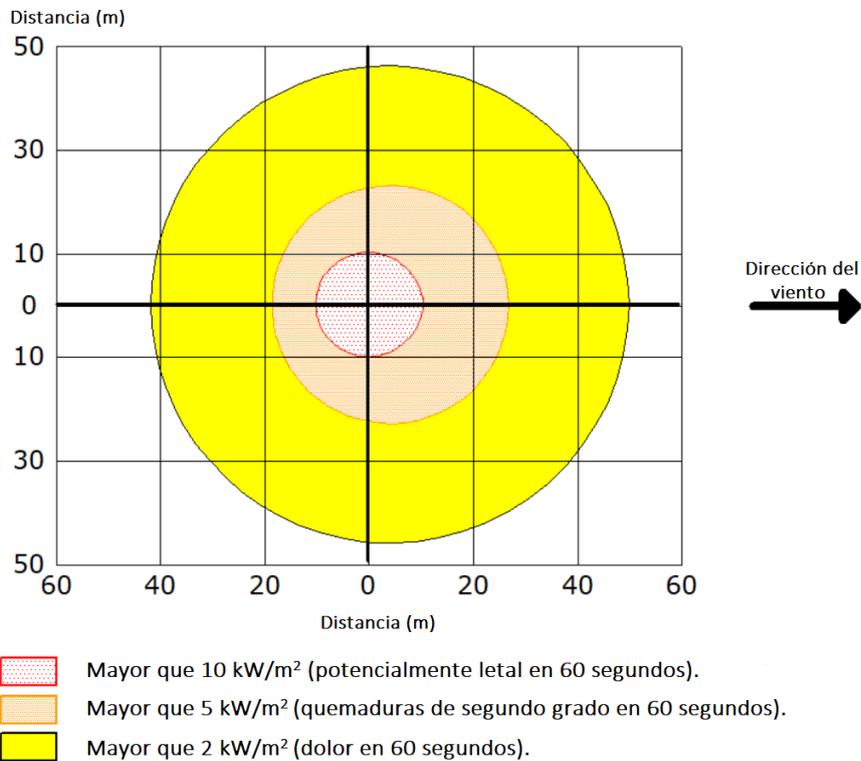


Figura 10-23. Representación gráfica de las zonas de planificación Jet Fire.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

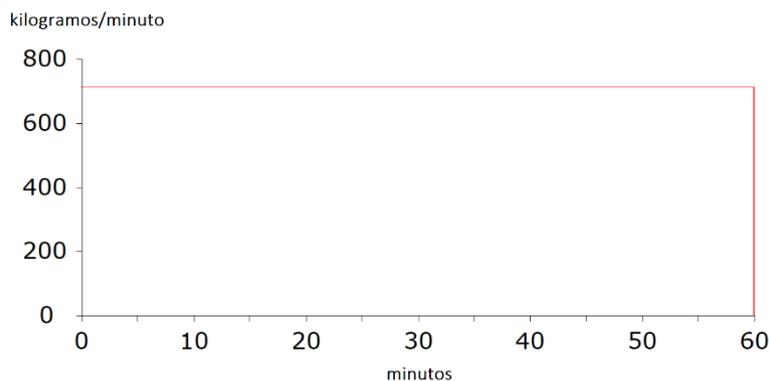


Figura 10-24. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.

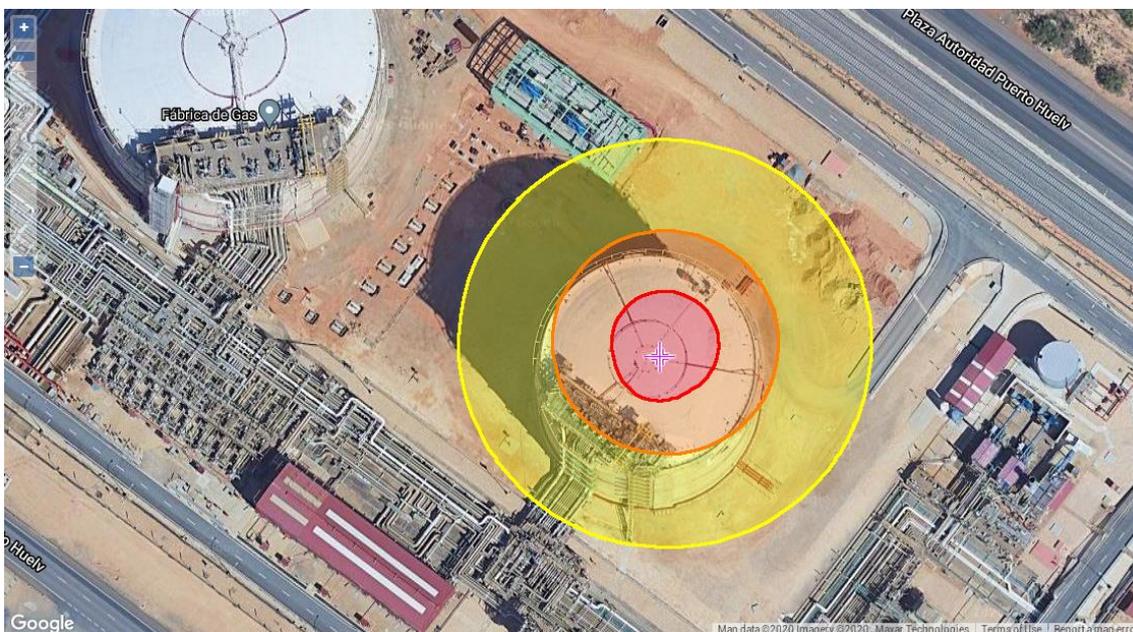


Figura 10-25. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Al igual que para la dirección suroeste y noreste, en este caso, como se muestra en la Figura 10-25., la radiación térmica producida por el Jet Fire no tiene mucha relevancia sobre los equipos contiguos. Aun así, se puede establecer medidas de prevención como las comentadas anteriormente, es decir, se puede implantar una barrera cortafuegos o un cubeto sobre el tanque objeto de estudio.

10.4.4. Protección y prevención frente a un Jet Fire

Al igual que se describió y desarrolló para la nube tóxica, es aplicable a un Jet Fire aspectos como: equipo de protección individual, higiene personal, muestreos, análisis y alarmas en el entorno de trabajo y primeros auxilios e información adecuada al personal sanitario en caso de accidente (ver epígrafes 10.2.4.2., 10.2.4.3., 10.2.4.4. y 10.2.4.5.).

10.4.4.1. Sistemas para defensa contra incendios

Una vez que el incendio se ha producido, se debe tener en cuenta los sistemas de defensa contra incendios que constituyen una herramienta destinada a minimizar el daño.

En este aspecto, es importante señalar las normas UNE-23032/83 que fijan la terminología y establece los símbolos a emplear en esquemas y planos.

Los sistemas de defensa contra incendios se pueden clasificar bajo tres puntos de vista [2]:

- A. Según su función:
 - a. Medios para detección: pueden ser humanos o automáticos.
 - b. Medios para alarma: pulsadores manuales o automáticos.
 - c. Medios para extinción.
- B. Según el medio extintor:
 - a. Agua: aplicada en chorro, aplicada en pulverización y aplicada en niebla.
 - b. Espumas: de baja expansión, de media expansión, de alta expansión y AFFF.
 - c. Polvo químico: normal, antibrasa y especiales.
 - d. Gases: anhídrido carbónico y otros gases.
- C. Según la disposición y aplicación:
 - a. Sistemas fijos: redes DCI (redes para extinción con aplicación mecánica como boquillas, pulverizadores, etc.) y redes de servicio a equipos portátiles (Boca de incendio equipada y columna hidratante exterior).
 - b. Equipos móviles de gran capacidad: camiones cisterna, motobombas portátiles, etc.
 - c. Equipos portátiles: extintores, monitores, mangueras, etc.

10.5. Modelización de una nube tóxica con efecto dominó

En este apartado, se realizará la simulación de una nube tóxica, que debido a la cercanía de otros equipos y de diferentes fuentes de ignición, puede provocar un efecto dominó en la instalación. De igual forma que las simulaciones anteriores, el software ALOHA solicita una serie de datos que son desarrollados a continuación. En este caso, también se tendrán en cuenta las siguientes direcciones de viento: SW, NW y NNE.

10.5.1. Modelización de una nube tóxica con efecto dominó: SW

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH₄).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: SW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Mar abierto.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad E (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la fuga tóxica:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.

Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.

Duración de la fuga: 1 hora.

Caudal máximo fugado: 687 kg/min.

Cantidad total fugada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: Valor umbral de sobrepresión en la zona de alerta es de 50 mbar. Presión de 0,049 atmósferas. (Según el REAL DECRETO 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas)

Distancia: 336 m.

- Zona de intervención: Valor umbral de sobrepresión en la zona de intervención es de 125 mbar. Presión de 0,123 atmósferas.

Distancia: 324 m.

- Efecto dominó: Valor umbral de sobrepresión para que se produzca efecto dominó es de 160 mbar. Presión de 0,158 atmósferas.

Distancia: 322 m.

Representación gráfica de las zonas:

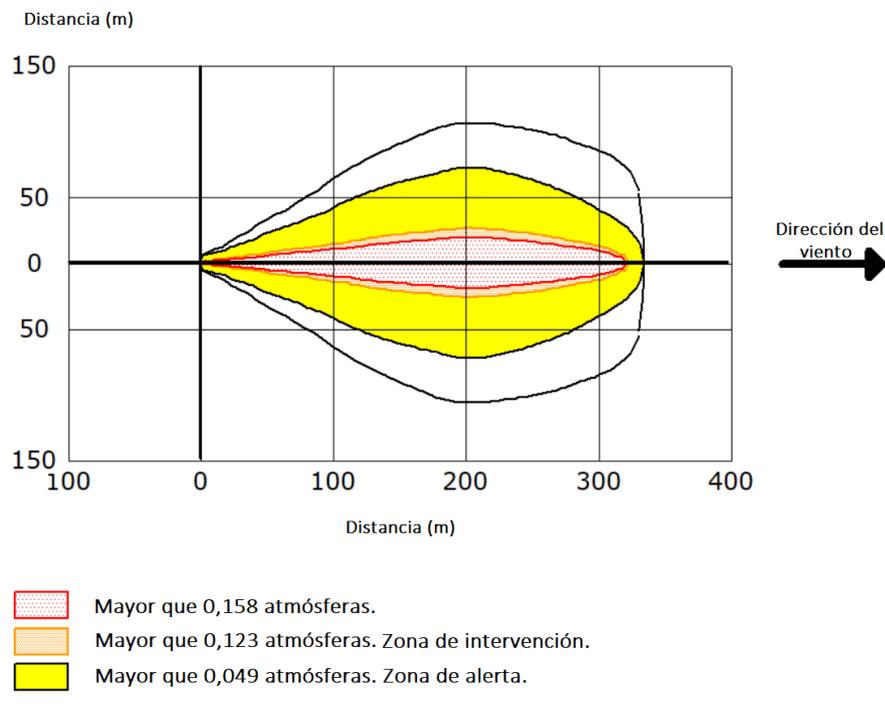


Figura 10-26. Representación gráfica de las zonas de planificación de una nube tóxica con efecto dominó.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

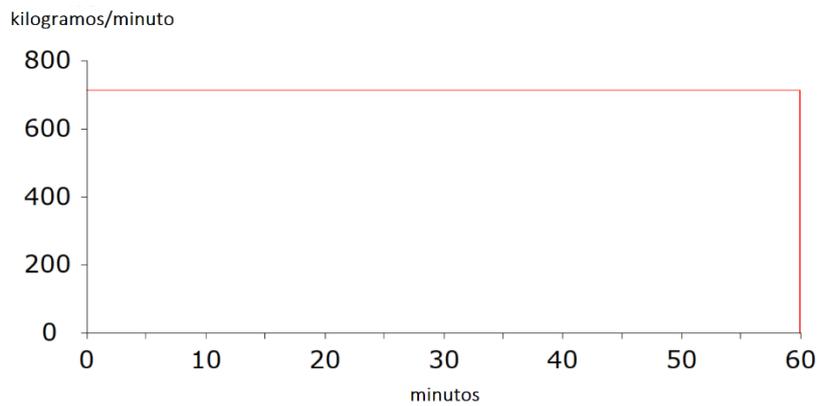


Figura 10-27. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.



Figura 10-28. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-28. la explosión, desencadenada como consecuencia de la formación de una nube tóxica al fugar gas natural licuado del tanque, tiene dirección suroeste. A esta dirección, se puede localizar un entramado de tuberías de la propia instalación que se verá alcanzado por la explosión. Cabe destacar, que estas tuberías transportan el gas natural licuado desde los buques metaneros hasta los correspondientes tanques de almacenamiento lo que agrava la situación.

Para evitar un accidente de mayor magnitud, es necesario implantar [2]:

- **Venteos de emergencia:** estos permitirán aliviar un exceso de presión interna causado por fuegos contiguos sobre las tuberías y tanques. Al ser tanques verticales, puede emplearse techos flotantes, techos móviles o unión débil del techo.

- **Tuberías de venteo:** estarán situadas de forma que los vapores sean descargados en un lugar seguro.

10.5.2. Modelización de una nube tóxica con efecto dominó: NW

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH₄).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Urbano o forestal.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad C (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la explosión:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.

Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.

Duración de la fuga: 1 hora.

Caudal máximo fugado: 687 kg/min.

Cantidad total fugada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: Valor umbral de sobrepresión en la zona de alerta es de 50 mbar. Presión de 0,049 atmósferas. (Según el REAL DECRETO 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas)

Distancia: 78 m.

- Zona de intervención: Valor umbral de sobrepresión en la zona de intervención es de 125 mbar. Presión de 0,123 atmósferas.

Distancia: 55 m.

- Efecto dominó: Valor umbral de sobrepresión para que se produzca efecto dominó es de 160 mbar. Presión de 0,158 atmósferas.

Distancia: 53 m.

Representación gráfica de las zonas:

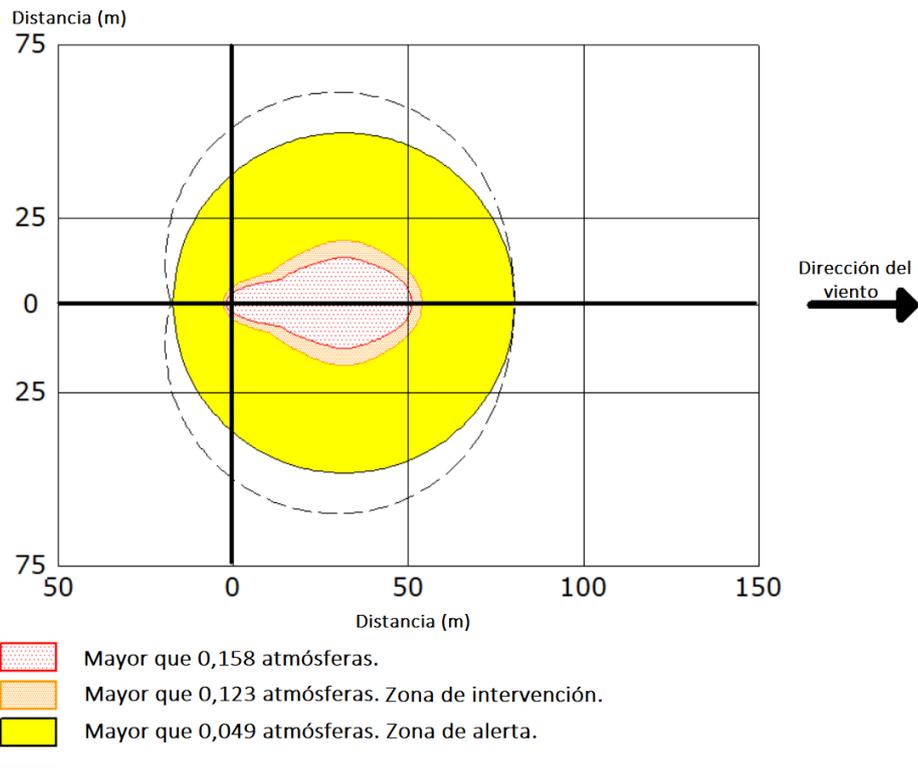


Figura 10-29. Representación gráfica de las zonas de planificación de una nube tóxica con efecto dominó.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

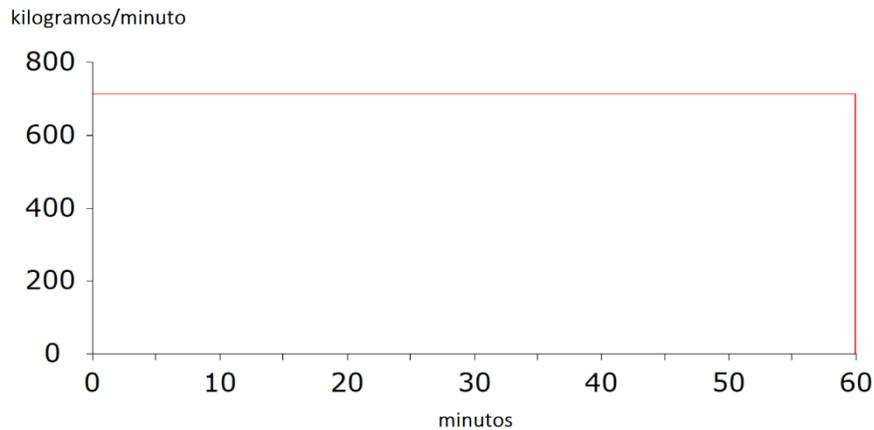


Figura 10-30. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.

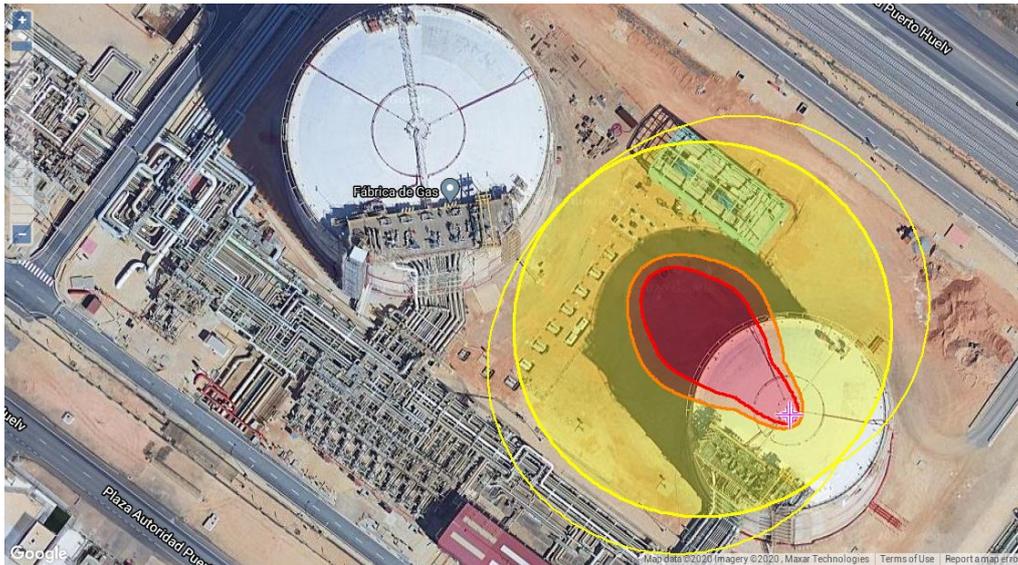


Figura 10-31. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-31., la explosión puede alcanzar otros equipos que se encuentran contiguos al tanque. Más concretamente tiene riesgo de ser alcanzado un tanque y un equipo situado en la zona superior derecha. Para evitar que se produzca un mayor efecto como consecuencia del accidente, es necesario tomar las siguientes medidas [23]:

- **Muros protectores como protección pasiva:** éste puede aplicarse sobre el equipo de la parte superior derecha, con el objetivo de evitar que éste sea alcanzado por fragmentos producto de la explosión y por radiación térmica.
- **Aislamiento térmico de equipos:** evitando la propagación de las altas temperaturas como consecuencia del incendio provocado. La mejor forma de aislar los equipos es mediante enterramiento de los mismos. Entre los revestimientos, destacan: lanas de vidrio, hormigones especiales, pinturas intumescentes, etc.
- **Prevención de roturas en las paredes de los tanques de almacenamiento:** estos revestimientos sirven de protección contra cualquier impacto.
- **Sistemas retardantes de la nucleación espontánea:** consiste en un enrejillado metálico formado por láminas expandidas de una aleación de aluminio en forma de celdillas hexagonales, aplicado en el interior del recipiente. Con ello se consigue:
 - En el caso de incendio, el calor recibido en la superficie del recipiente se distribuye por toda la masa del líquido y del gas, retrasando la aparición de posibles fisuras en el tanque.
 - Al lograrse una mayor distribución del calor recibido la presión no se verá incrementada tan rápidamente.
 - Si en el recipiente hubiera aire en concentraciones dentro del campo de inflamabilidad, la malla de las celdillas actuaría a modo de apagallamas por dispersión del calor generado.

10.5.3. Modelización de una nube tóxica con efecto dominó: NNE

- A. **Localización y fecha:** Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.
- B. **Sustancia o producto implicado en el accidente:** Metano (CH_4).
- C. **Datos atmosféricos:**

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NNE, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Campo abierto.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad C (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 50,5 m.

Longitud: 30 m.

Volumen: 60.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 25.307 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la explosión:

Diámetro del orificio de la fuga: 5 cm.

Situación del orificio: 5 m con respecto al fondo.

Duración de la fuga: 1 hora.

Caudal máximo fugado: 687 kg/min.

Cantidad total fugada: 41.200 kg.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

Según el REAL DECRETO 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas:

- Zona de alerta: 50 mbar (0,049 atm).
Distancia: 78 m.
- Zona de intervención: 150 mbar (0,123 atm).
Distancia: 55 m.
- Efecto dominó: 160 mbar (0,158 atm).
Distancia: 53 m.

Representación gráfica de las zonas:

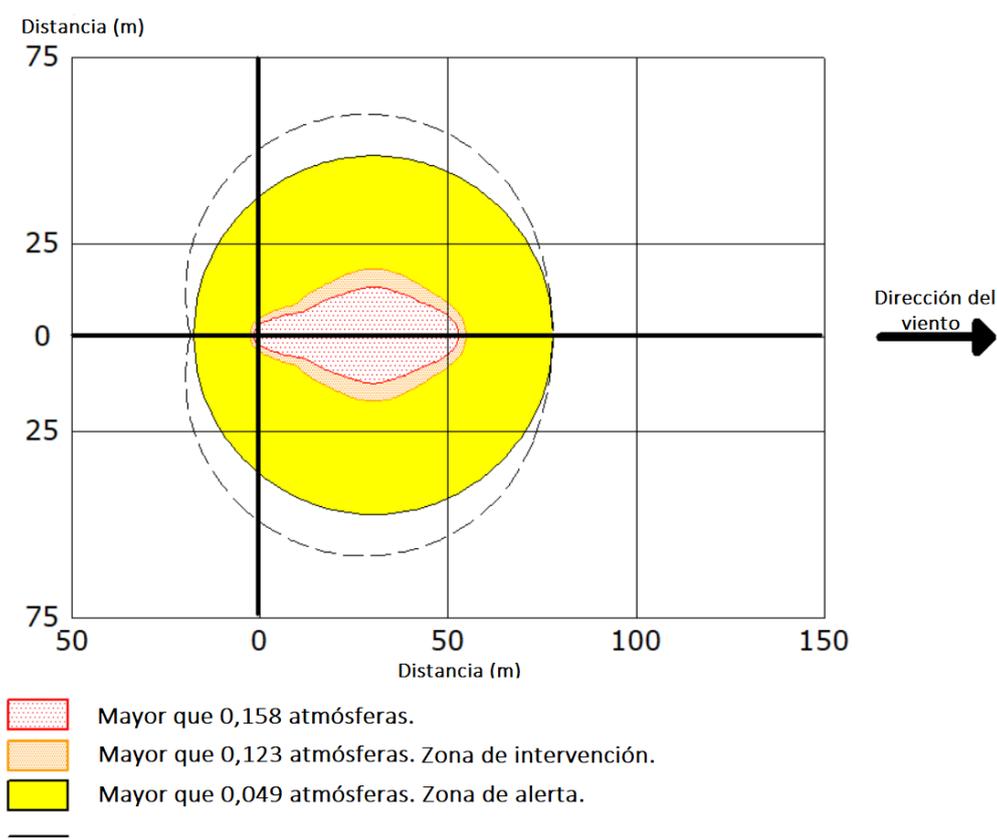


Figura 10-32. Representación gráfica de las zonas de planificación de una nube tóxica con efecto dominó.

En esta figura se muestra la sobrepresión de la nube de vapor que provoca un VCE.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

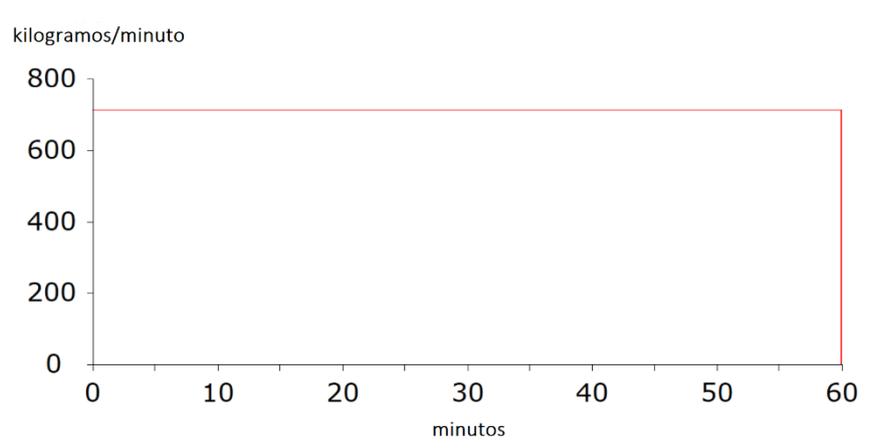


Figura 10-33. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.

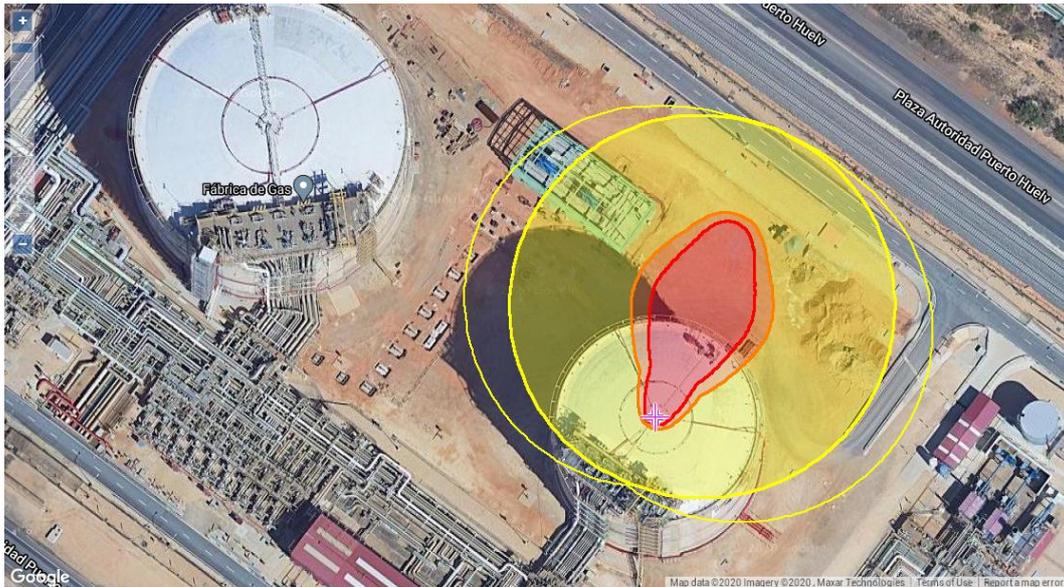


Figura 10-34. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-34., la explosión en este caso solo afecta a un equipo y, como se ha comentado anteriormente, algunas de las medidas, para evitar que este equipo se vea dañado, son:

- **Muros protectores como protección pasiva.**
- **Aislamiento térmico de equipos.**

10.5.4. Protección y prevención frente a un accidente con efecto dominó

De igual forma que los dos accidentes anteriores (nube tóxica y Jet Fire), se debe tener en cuenta: los equipos de protección individual; la higiene personal; muestreos, análisis y alarmas en el entorno de trabajo y primeros auxilios e información adecuada al personal sanitario en caso de accidente (ver epígrafes 10.2.4.2., 10.2.4.3., 10.2.4.4. y 10.2.4.5.).

10.6. Modelización de una BLEVE

En este apartado se llevará a cabo la simulación de una BLEVE para las tres direcciones de viento (SW, NW y NNE). Para ello, se va a suponer que material predominante, con el cual el tanque ha sido fabricado, es el acero al carbono.

Para poder llevar a cabo la simulación de la BLEVE, ALOHA establece como máximo una cantidad másica de sustancia de 5.000 toneladas. Por tanto, se va a suponer que se dispone de un tanque de 30 metros de diámetro y 14,1 metros de altura que contiene 10.000 m³ de gas natural licuado.

En cuanto al establecimiento de los límites de cada zona de amenaza, se van a tener en cuenta los que por defecto selecciona ALOHA, ya que, si se seleccionan los límites legislados, estos deben reducirse en seis unidades para que sea representativo del volumen tomado. Este hecho hace que, ALOHA no permita introducir estos límites, ya que no cumplen los requisitos establecidos por el software.

Como resultado de las modificaciones anteriores, se podrá observar como las zonas de amenaza albergaran un área mayor de la esperada. Por ello, y con objeto de comparación, se va a

realizar posteriormente los cálculos, empleando el modelo TNT de evaluación, para obtener el área de las distintas zonas de amenaza.

10.6.1. Modelización de una BLEVE: SW

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH₄).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: SW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Mar abierto.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad E (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 30 m.

Longitud: 14,1 m.

Volumen: 11.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 4.640 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la explosión:

Diámetro de la bola de fuego: 967 m.

Duración del incendio: 42 segundos.

F. Cálculo de las zonas de amenaza (radiación térmica procedente de la bola de fuego):

Según la NTP 293, se establece de forma orientativa que los materiales pueden tolerar unos valores determinados de radiación máxima. Destacándose que el acero al carbono es de 40 kW/m². Teniendo en cuenta que este valor, se va a suponer como valor máximo el de 40 KW/m², valor intermedio 20 kW/m² y valor mínimo 5 KW/m².

- Zona de alerta: 5 kW/m².
Distancia: 4,4 m.
- Zona de intervención: 20 kW/m².
Distancia: 2,9 km.
- Zona crítica: 40 kW/m².
Distancia: 2,0 km.

Representación gráfica de las zonas:

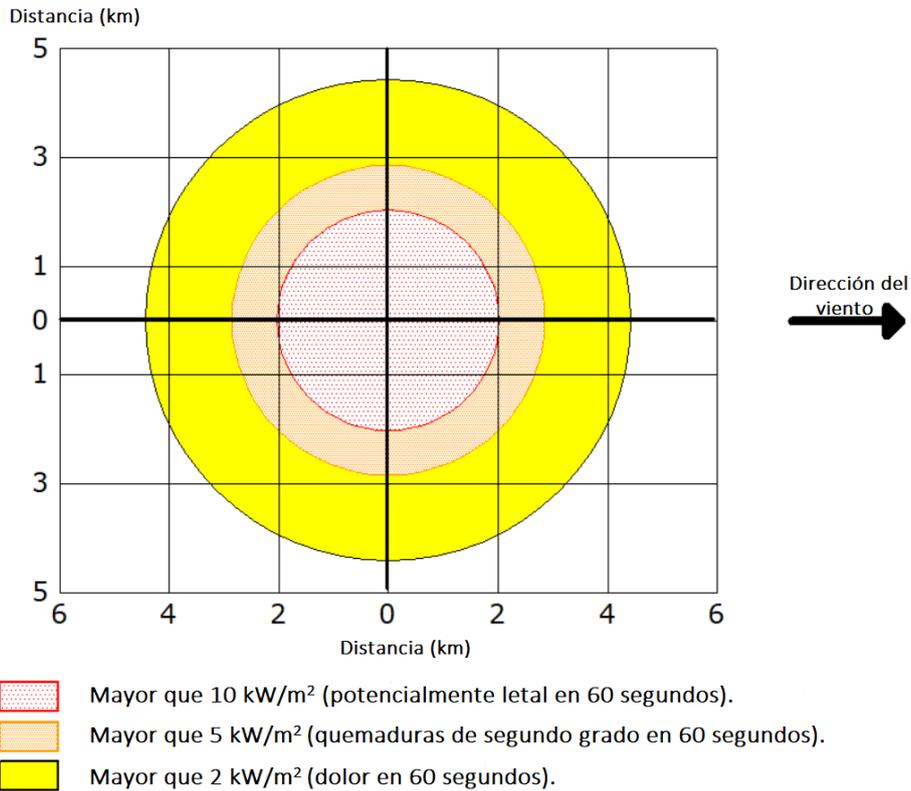
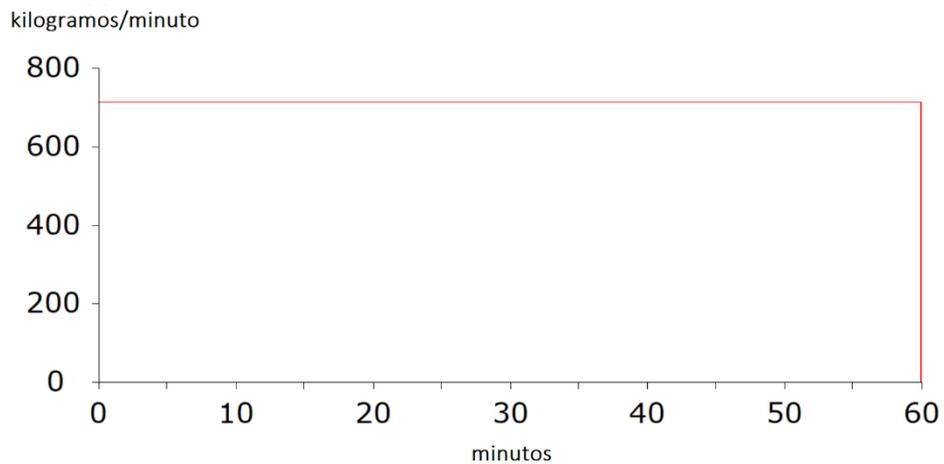


Figura 10-35. Representación gráfica de las zonas de planificación de una BLEVE.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.



Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.

Figura 10-36. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

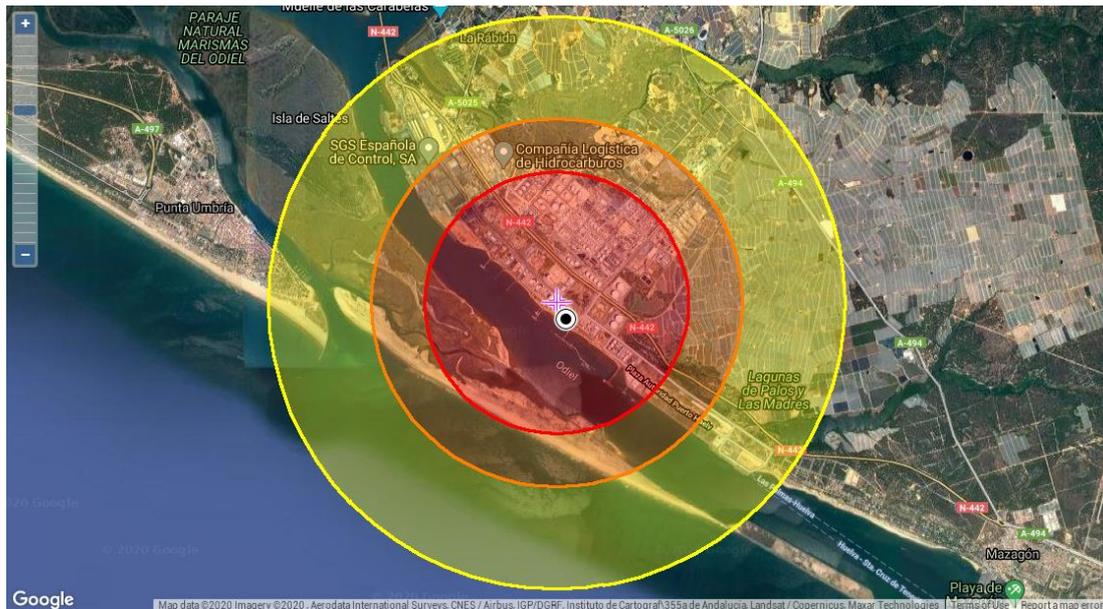


Figura 10-37. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-37, la radiación térmica de la zona de alerta provocada como consecuencia de una BLEVE alcanza las dos poblaciones, Punta Umbría y Palos de la Frontera, contiguas a la zona industrial en la cual se encuentra la instalación. En cuanto a la zona de efecto dominó es de vital importancia que todos los equipos que se encuentre bajo esa zona estén equipados de sistemas de prevención y protección contra accidentes tanto de tipo térmico como de tipo mecánico.

Como ya se ha comentado anteriormente, algunos de estos sistemas son:

- Muros protectores como protección pasiva.
- Aislamiento térmico de equipos.
- Prevención de roturas en las paredes de los tanques de almacenamiento.
- Sistemas retardantes de la nucleación espontánea.

10.6.2. Modelización de una BLEVE: NW

A. Localización y fecha: Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.

B. Sustancia o producto implicado en el accidente: Metano (CH_4).

C. Datos atmosféricos:

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NW, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Urbano o forestal.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad C (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 30 m.

Longitud: 14,1 m.

Volumen: 11.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 4.640 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la explosión:

Diámetro de la bola de fuego: 967 m.

Duración del incendio: 42 segundos.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 5 kW/m².
Distancia: 4,4 km.
- Zona de intervención: 20 kW/m².
Distancia: 2,9 km.
- Zona crítica: 40 kW/m².
Distancia: 2 km.

Representación gráfica de las zonas:

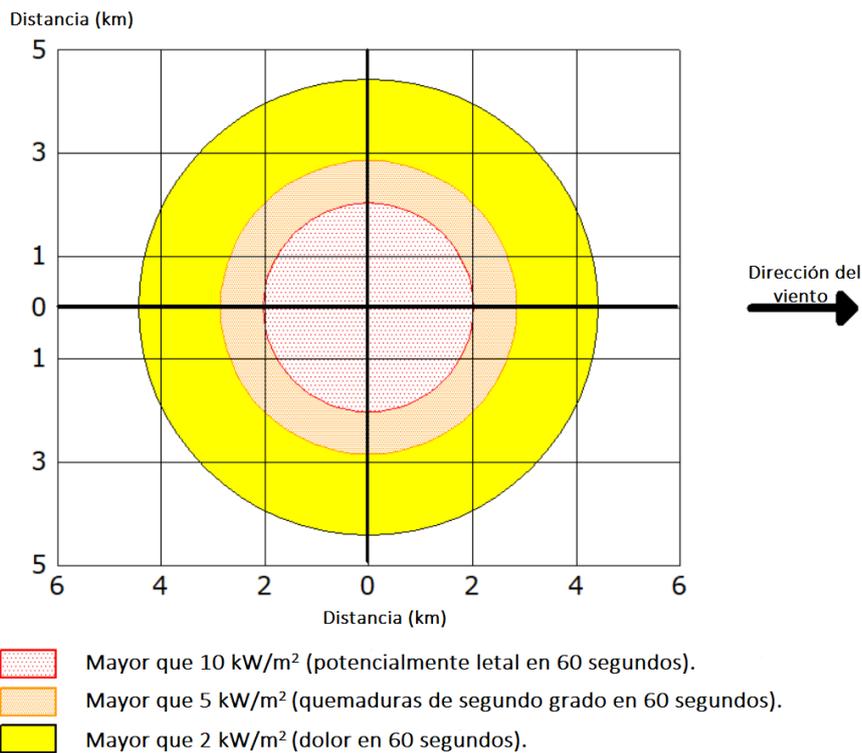


Figura 10-38. Representación gráfica de las zonas de planificación de una BLEVE.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

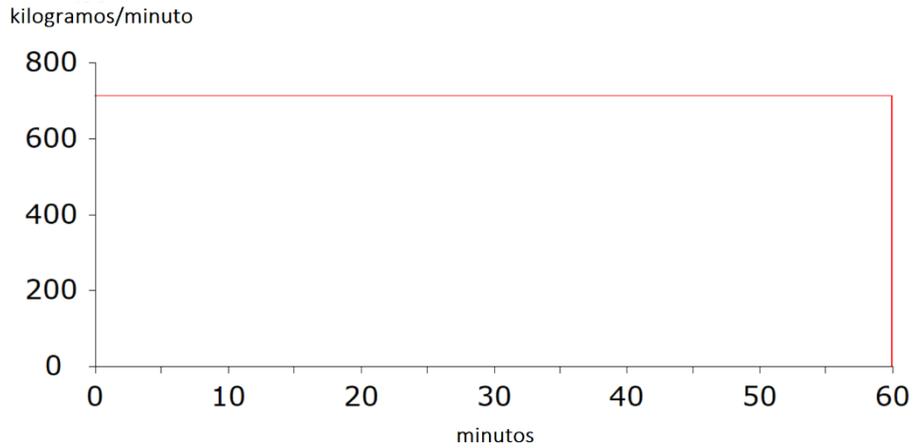


Figura 10-39. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.

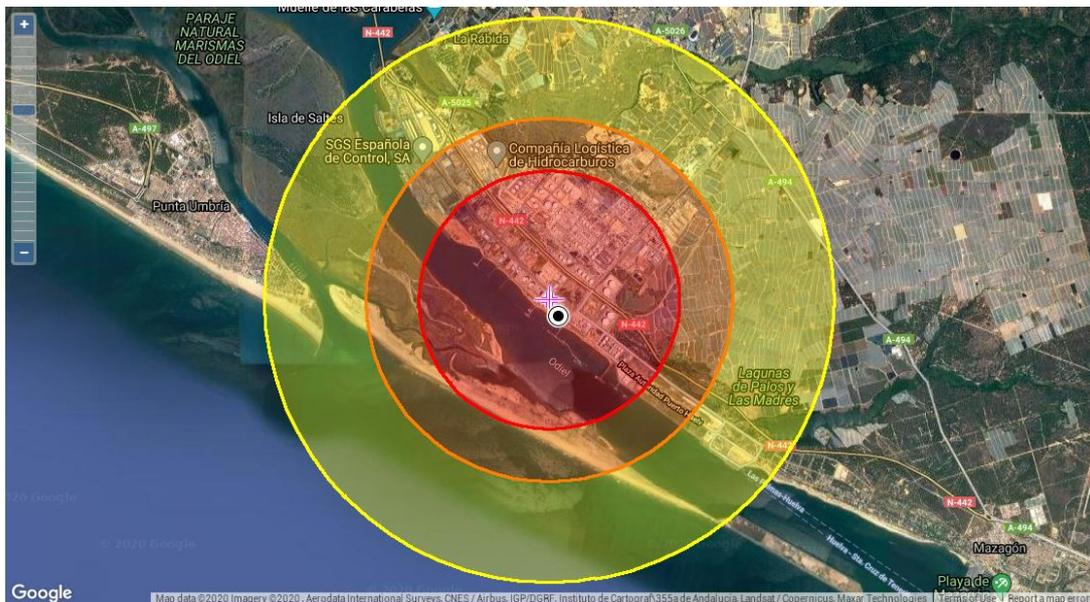


Figura 10-40. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-40, y se ha comentado en la simulación anterior, la radiación térmica de la zona de alerta provocada como consecuencia de una BLEVE alcanza las dos poblaciones, Punta Umbría y Palos de la Frontera, contiguas a la zona industrial en la cual se encuentra la instalación. En cuanto a la zona de efecto dominó es de vital importancia que todos los equipos que se encuentre bajo esa zona estén equipados de sistemas de prevención y protección contra accidentes tanto de tipo térmico como de tipo mecánico.

10.6.3. Modelización de una BLEVE: NNE

- A. **Localización y fecha:** Palos de la Frontera, Huelva (España). 30 de abril de 2020 a las 18.00 horas.
- B. **Sustancia o producto implicado en el accidente:** Metano (CH₄).
- C. **Datos atmosféricos:**

Velocidad del aire: 4,44 m/s. Dirección: NNE, medido a 10 m de altura.

Rugosidad del terreno: Urbano o forestal.

Temperatura del aire: 20°C.

Cobertura de nubes: Poco cubierto.

Clase de estabilidad: Estabilidad C (sin inversión térmica).

Humedad relativa: 58%.

D. Características del tanque de almacenamiento:

Tanque cilíndrico vertical (contiene líquido).

Diámetro: 30 m.

Longitud: 14,1 m.

Volumen: 11.000 m³.

Temperatura interna: -161°C.

Masa inicial del producto en el interior: 4.640 toneladas. Tanque al 100%.

E. Datos sobre la explosión:

Diámetro de la bola de fuego: 967 m.

Duración del incendio: 42 segundos.

F. Cálculo de las zonas de amenaza:

- Zona de alerta: 7kW/m².
Distancia: 4,4 km.
- Zona de intervención: 4kW/m².
Distancia: 2,9 km.
- Zona crítica: 1 kW/m².
Distancia: 2,0 km.

Representación gráfica de las zonas:

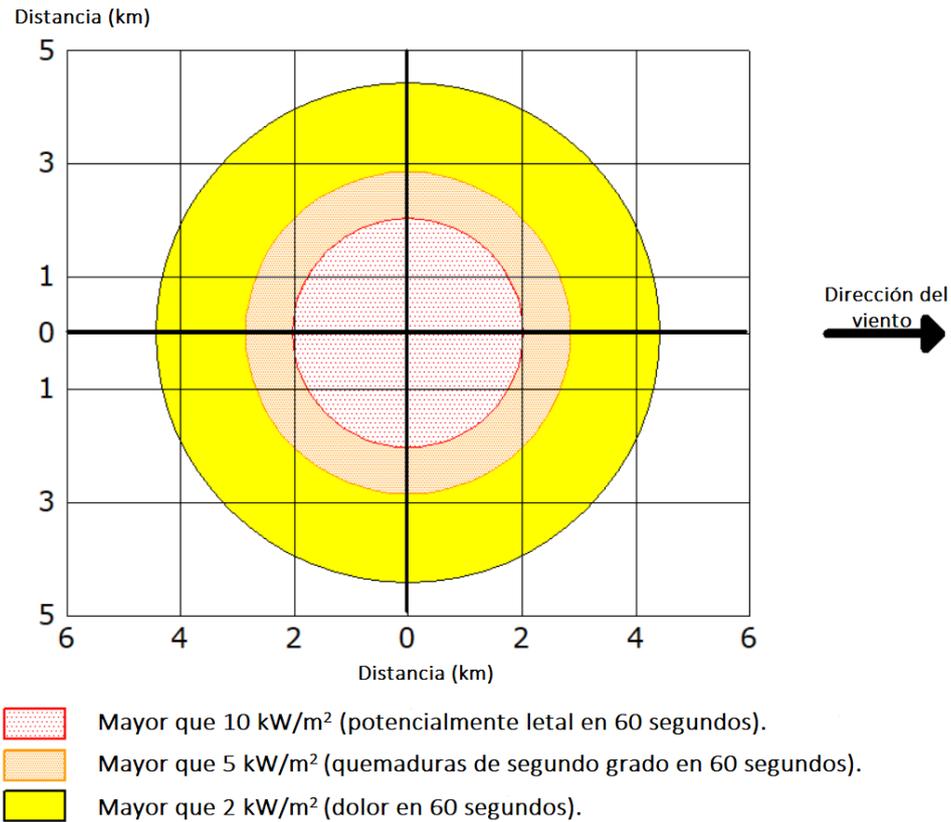


Figura 10-41. Representación gráfica de las zonas de planificación de una BLEVE.

A continuación, se muestra la relación de la intensidad de liberación de la fuente. El área debajo de la línea roja es el total de cantidad de gas liberado en el aire. Se puede observar que esta es constante a lo largo del tiempo hasta que se alcanza la hora donde la fuga cesa.

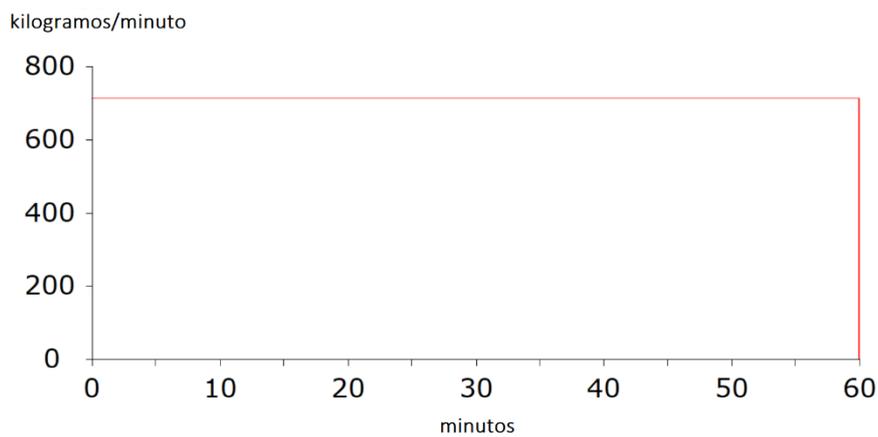


Figura 10-42. Representación gráfica de la intensidad de liberación de la fuente.

Finalmente, mediante el empleo del software **MARPLOT**, se representan las distintas zonas de amenaza sobre la imagen satelital de la instalación.

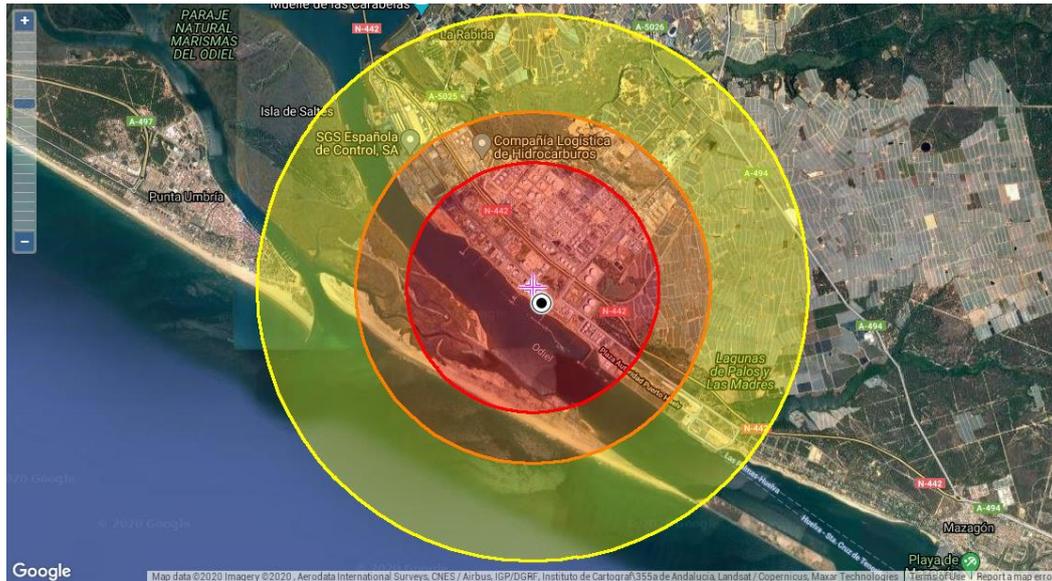


Figura 10-43. Representación de las zonas de planificación sobre el mapa.

Como se muestra en la Figura 10-43, y se ha comentado en la simulación anterior, la radiación térmica de la zona de alerta provocada como consecuencia de una BLEVE alcanza las dos poblaciones, Punta Umbría y Palos de la Frontera, contiguas a la zona industrial en la cual se encuentra la instalación. En cuanto a la zona de efecto dominó es de vital importancia que todos los equipos que se encuentre bajo esa zona estén equipados de sistemas de prevención y protección contra accidentes tanto de tipo térmico como de tipo mecánico.

10.6.4. Modelo TNT de evaluación.

Como se comentó en el Capítulo 6, para la evaluación de las consecuencias de una explosión, existen diversos modelos, siendo el más empleado el modelo TNT de evaluación.

En este apartado se desarrollan los cálculos necesarios para determinar las distintas zonas de amenaza con el objetivo de corroborar si las simulaciones realizadas anteriormente para este tipo de accidente son correctas.

Conociendo los siguientes datos sobre la sustancia química y las características atmosféricas de la zona, podemos realizar los cálculos pertinentes:

- Humedad relativa = 58%.
- Densidad del metano = 0,657 kg/m³.
- Temperatura de ebullición = -433 K.
- Temperatura absoluta inicial del líquido = -434 K.
- Calor específico a presión constante = 35,69 kJ/kg K.
- Calor latente de vaporización = 760 kJ/kg.
- Calor de combustión del TNT = 4.250 kJ/kg.

La cantidad de metano líquido vaporizado se calcula mediante la siguiente fórmula termodinámica:

$$F_v = C_p \frac{T - T_b}{h_{fg}} \quad (10-1)$$

Sustituyendo los datos en la ecuación:

$$F_v = 35,69 \frac{kJ}{kg K} \cdot \frac{-434K - (-433K)}{760 kJ/kg} = 0,047 \quad (10-2)$$

Basándose en la experiencia de Kletz, este recomienda que, para estos casos, se duplique el valor por lo que el porcentaje queda será de 9,4%.

El siguiente cálculo a realizar es el cálculo de la masa equivalente de TNT. Para ello, se debe considerar que el rendimiento o la eficacia de la explosión (η) es 0,1 lo que significa que el 10% de la masa de vapor existente en la nube, reacciona en la explosión.

$$W = \frac{0,1 \cdot (-3.702)kg \cdot (-4.675) \frac{kJ}{kg}}{4520 \frac{kJ}{kg TNT}} = 383 \text{ kg de TNT} \quad (10-3)$$

A continuación, se procede a la delimitación de las distintas zonas de amenaza.

- Zona de Alerta.

Para la zona de alerta la sobrepresión local estática de la onda de presión es de 50 mbar (0.050 bar o 5 kPa).

Empleando el gráfico de la Figura 6-9, a 5 kPa le corresponde una distancia escalada de X = 17 equivalente a:

$$R = 17 \times 383^{1/3} = 123 \text{ m} \quad (10-4)$$

- Zona de Intervención.

La sobrepresión local estática de la onda de presión es de 125 mbar (12,5 kPa).

Empleando el gráfico de la Figura 6-9, a 12,5 kPa corresponde una distancia X = 9 equivalente a una:

$$R = 9 \times 383^{1/3} = 65 \text{ m} \quad (10-5)$$

- Efecto dominó.

La sobrepresión local estática de la onda de presión es de 160 mbar (16 kPa).

Empleando el gráfico de la Figura 6-9, a 16 kPa corresponde una distancia X = 7 equivalente a una:

$$R = 7 \times 383^{1/3} = 51 \text{ m} \quad (10-6)$$

Finalmente, se puede concluir que los cálculos realizados anteriormente no coinciden con las modelizaciones realizadas en el software ALOHA. El motivo se debe a que, al limitar el software, la masa del tanque y los límites de las zonas de amenaza, la simulación no tiene en cuenta los parámetros idóneos, por lo que ésta no es representativa de la realidad.

11. CONCLUSIONES

Para la elaboración de este Trabajo Fin de Máster se ha investigado todo lo posible sobre la instalación objeto de simulación, para poder de esta forma describir el entorno inmediato o zona de influencia en cuanto a sus datos meteorológicos, demográficos, geográficos, fauna y flora.

Se ha examinado la normativa vigente de aplicación a tener en consideración. También, se ha investigado sobre las variables y factores que condicionan a cada uno de los accidentes con posibilidad de ocurrencia.

Se ha descrito el proceso tecnológico y los distintos componentes de la instalación con el fin de comprender el comportamiento de cada accidente.

Tras el estudio de todo ello se ha procedido a la realización de las modelizaciones en las cuales se han tenido en cuenta cuatro tipos de accidentes que son: nube tóxica, jet fire, nube tóxica con efecto dominó y BLEVE. Estas simulaciones llevan consigo aparejado una serie de medidas de prevención y protección contra accidentes para evitar que estas se produzcan, o bien, para minimizar sus consecuencias tanto para los equipos contiguos como para el personal que puede verse inmerso en los distintos accidentes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Salomón Llanes y M. Perdomo Ojeda, *Análisis de Riesgo Industrial*, Caracas: Centro de Estudios Gerenciales ISID, 2001.
- [2] J. M. Storch de Gracia y T. García Martín, *Seguridad industrial en plantas químicas y energéticas. Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño.*, Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 2008.
- [3] E. Planas, J. Arnaldos, R. Darbra, M. Muñoz, E. Pastor y J. Vílchez, «Historical evolution of process safety and major-accident hazards prevention in Spain. Contribution of the pioneer Joaquim Casal,» *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 28, pp. 109-117, 2014.
- [4] G. Arturson, «The Los Alfaques Disaster: a boiling-liquid, expanding-vapour explosion,» de *Burns*, Texas, University of Texas Medical Branch at Galveston, 1981, pp. 233-251.
- [5] J. Grimalt, M. Ferrer y E. Macpherson, «The mine tailing accident in Aznalcollar,» *The Science of the Total Environment*, pp. 3-11, 1999.
- [6] «Magnet,» 7 Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://magnet.xataka.com/en-diez-minutos/beirut-antes-despues-explosion-vista-aire>.
- [7] J. Cuscó Vidal y E. Turmo Sierra, «NTP 475: Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera: fuentes puntuales instantáneas,» Centro Nacional de Condiciones de Trabajo, Madrid, 1998.
- [8] E. Turmo Sierra, «NTP 326: Radiación térmica en incendios de líquido y gases,» Centro Nacional de Condiciones de Trabajo, Madrid, 1999.
- [9] E. Turmo Sierra, «NTP 321: Explosiones de nubes de vapor no confinadas: evaluación de la sobrepresión,» Centro Nacional de Condiciones de Trabajo, Madrid, 1999.
- [10] J. M. Storch de Gracia y T. García Martín, *Seguridad industrial en Plantas Químicas y Energéticas. Fundamentos, evaluación de riesgos y diseño.*, Madrid: Diaz de Santos, 2008.
- [11] «Instituto Nacional de Estadística (INE),» [En línea]. Available: <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2874#!tabs-tabla>. [Último acceso: 15 Mayo 2020].
- [12] «Ficha Técnica Humedal 051HU,» Huelva.
- [13] IFAPA, «Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible,» 28 07 2020. [En línea]. Available: <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController?action=Static&url=view.jsp&path=0>.

- [14] «Weather Spark,» [En línea]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/33209/Clima-promedio-en-Palos-de-la-Frontera-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o>. [Último acceso: 15 Mayo 2020].
- [15] «Meteoblue,» [En línea]. Available: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/palos-de-la-frontera_espa%C3%B1a_2512950. [Último acceso: 15 Mayo 2020].
- [16] A. Santa Cruz, Difusión de contaminantes gaseosos en la atmósfera, 2000.
- [17] O. Rivas, «Declaración/Memoria ambiental 2018. Planta de almacenamiento y regasificación de Huelva. Enagás Transporte, S.A.U.,» 2018.
- [18] «Hoja Informativa sobre sustancias peligrosas: metano.,» 2016.
- [19] MITECO, «PRTR España. Registro de Emisiones y Fuentes Contaminantes,» 11 2007. [En línea]. Available: <http://www.prtr-es.es/CH4-metano,15588,11,2007.html#>.
- [20] B. Méndez Bernal, «NTP 338: Control de fugas en almacenamientos de gases licuados tóxicos (II),» 1999.
- [21] B. Méndez Bernal, «NTP 338: Control de fugas en almacenamiento de gases licuados tóxicos (II),» Centro Nacional de Condiciones de Trabajo, Madrid, 1999.
- [22] M. Viedma Muñoz, Análisis de las direcciones de los vientos en Andalucía, 1998, pp. 153-168.
- [23] S. López Riera, «Medidas de prevención y protección contra incendios.,» Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), Madrid, 2015.
- [24] Base de datos Meteorológicos, «Base de datos meteorológicos,» 2020 08 01. [En línea]. Available: <https://datosclima.es>.
- [25] «MeteoGlosario Visual. Diccionario ilustrado de meteorología.,» [En línea]. Available: https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/1043_inversion-termica.

Normativas

[26] **Real Decreto 840/2015**, de 21 de septiembre por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

[27] **Real Decreto 1196/2003**, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante riesgos de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas.

[28] Resolución de 30 de enero de 1991, de la Subsecretaría, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la directriz básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico.

[29] **Ley 31/1995**, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.

ÍNDICE DE CONCEPTOS

- Accidente grave: cualquier suceso que resulte de un proceso no controlado durante el funcionamiento de cualquier establecimiento al que sea de aplicación el Real Decreto 840/2015 que suponga un riesgo grave, inmediato o diferido, para la salud humana, los bienes o el medio ambiente, dentro o fuera del establecimiento y en el que intervengan una o varias sustancias peligrosas.
- Acción correctora: Acción tomada para eliminar la causa de una no conformidad detectada u otra situación indeseable.
- Acción preventiva: Acción tomada para eliminar la causa de una no conformidad potencial u otra situación potencialmente indeseable.
- Alcohol etílico: Sustancia incolora e inflamable en un punto de ebullición de 78°C.
- Almacenamiento: Presencia de una cantidad determinada de sustancia peligrosa con fines de almacenamiento, depósito en custodia o reserva.
- BLEVE: Acrónimo de la expresión inglesa *boiling liquid expanding vapor explosión*. Estallido producido por calentamiento externo de un recipiente que contiene un líquido a presión, al perder resistencia mecánica el material de la pared. El estallido producido es violento, pues al encontrarse el fluido muy sobrecalentado, se produce su ebullición a partir de la nucleación homogénea instantánea de una gran parte del mismo.
- Combustibilidad: Propiedad de una sustancia reductora por la que puede iniciar y mantener una reacción de oxidación con, y en presencia de, otra sustancia oxidante.
- Comburente: Propiedad de una sustancia que puede iniciar y mantener reacción de oxidación con, y en presencia de, otra sustancia reductora.
- Combustible: Sustancia susceptible de arder, bajo determinadas condiciones.
- Combustión: Reacción exotérmica de una sustancia, llamada combustible, con un oxidante, llamado comburente.
- Combustión espontánea: Combustión que no requiere un aporte de calor.
- Deflagración: Onda de combustión que se propaga a velocidad subsónica.
- Detonación: Explosión que se propaga a velocidad supersónica y que lleva asociada una onda de choque.
- Diclorodifeniltricloroetano: Conocido más comúnmente como DDT. Es un insecticida organoclorado sintético de amplio espectro, acción prolongada y estable, aplicado en el control de plagas para todo tipo de cultivos.
- Dioxina: Según el International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), se denomina dioxina al subproducto tóxico de herbicidas. Con este nombre se agrupan a los compuestos pertenecientes a dos estructuras químicas diferentes: policlorodibenzo-p-dioxinas (PCDDs) y policlorodibenzofuranos (PCDFs) que pertenecen al grupo de los contaminantes orgánicos lipofílicos y persistentes.
- Disco de ruptura: Consiste en una lámina metálica delgada, sujeta entre bridas, que rompe su presión nominal de consigna. Se emplea cuando se requiere una gran rapidez de respuesta (ante una explosión) y suele situarse intercalada antes o después de una válvula de alivio o de seguridad.
- Dosis: Cantidad de una sustancia incorporada al organismo por cualquier vía de exposición, referida a la unidad de masa del organismo vivo receptor.
- Efecto: Magnitud del mismo. Se puede medir en términos de pérdida de una fracción o porcentaje de alguna función fisiológica; como umbral de letalidad; como letalidad en porcentaje o en tanto por uno, o en términos de severidad.
- Efecto dominó: Concatenación de efectos que multiplica las consecuencias de un accidente, debido a que los fenómenos peligrosos pueden afectar, además de los elementos vulnerables del exterior, a otros recipientes, tuberías o equipos del mismo

establecimiento próximos, de tal manera que se produzca una nueva fuga, incendio, explosión o estallido de los mismos, que genere a su vez nuevos fenómenos peligrosos.

- Emergencia: Cualquier situación imprevista que por su posibilidad de producir accidentes graves requiere una intervención de carácter prioritario.
- Estricnina: Alcaloide estimulante del sistema nervioso central. Es muy popular como catártico en medicina herbal.
- Implantación: Puesta en práctica de sistemas y procedimientos recogidos en la documentación de un establecimiento, así como de su dotación de medios, de acuerdo con la normativa vigente.
- Inflamabilidad: Conjunto de características físico-químicas que determina que, cuando la masa de combustible sobrepasa una temperatura dada, los vapores emitidos por la misma, en presencia del comburente y en unas proporciones adecuadas de ambas sustancias, se inicia una reacción de combustión, en presencia de una fuente externa de ignición.
- Inflamable: Susceptible de entrar y de continuar en estado de combustión con desprendimiento de llamas durante o después de ser sometido a una fuente de calor, bajo condiciones de ensayo determinadas.
- Inversión térmica: Fenómeno consistente en un aumento de la temperatura del aire con la altitud, es decir, conforme ascendemos en una capa de la atmósfera las temperaturas cada vez son más altas. Se denomina inversión, ya que lo habitual es que al ascender en altitud las temperaturas disminuyan.

Existen diferentes tipos de inversiones térmicas: por radiación como consecuencia del enfriamiento nocturno del suelo, y que puede provocar la acumulación de contaminantes cerca de los focos emisores; y la inversión por sedimentación, que se forma por el movimiento descendente del aire en los anticiclones o la inversión del alisio, formada entre una capa húmeda y fresca que acompaña a estos vientos y la masa cálida subsidente superior.

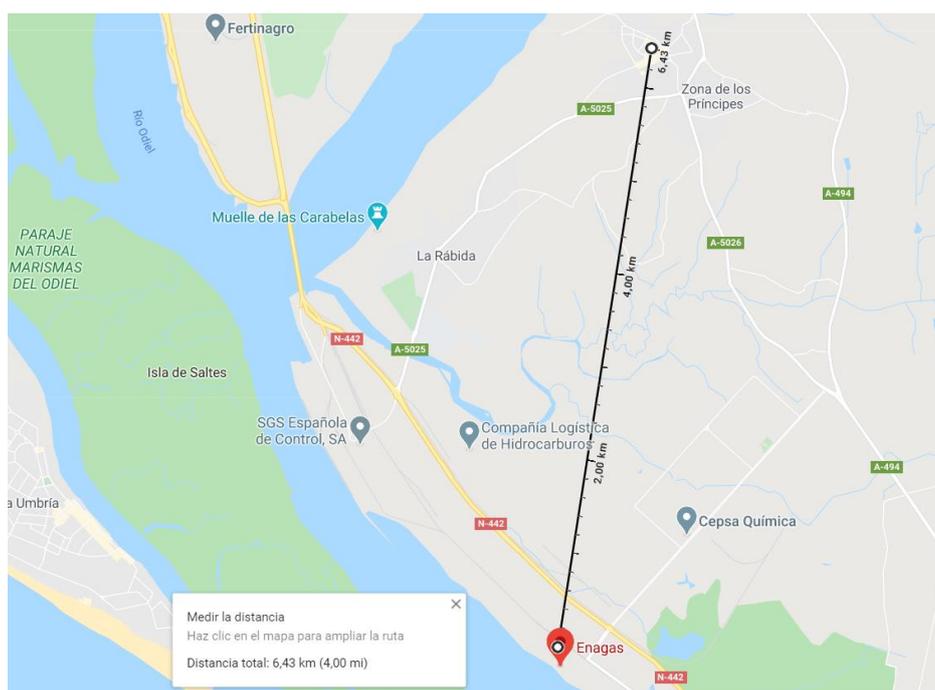
- Límite inferior de explosividad (LIE): Concentración mínima de gases, vapores o nieblas inflamables en aire por debajo de la cual, la mezcla no es explosiva.
- Límite inferior de inflamabilidad: Concentración de una sustancia inflamable en aire u otro comburente en condiciones de operación por debajo de la cual no puede iniciarse la combustión.
- Límite superior de explosividad (LSE): Concentración máxima de gases, vapores o nieblas inflamables en aire por encima de la cual, la mezcla no es explosiva.
- Límite superior de inflamabilidad: Concentración de una sustancia inflamable en aire u otro comburente en condiciones de operación por encima de la cual no puede iniciarse la combustión.
- Medidas de control: Medidas para prevenir que un suceso peligroso derive en un accidente grave. Se incluyen medidas de tipo directo (prevención o limitación de consecuencias de pequeñas fugas que podrían incrementarse originando un accidente grave, por ejemplo, válvulas de seguridad, válvulas de control, sistemas de inundación, etc.).
- Medidas de mitigación: Medidas adoptadas para reducir las consecuencias de un accidente grave, una vez éste ha sucedido.
- Medidas de prevención: Medidas adoptadas para prevenir la secuencia de sucesos que pueden conducir a un accidente grave (precondiciones de diseño, construcción, operación, mantenimiento, etc.).
- Mezcla: Solución compuesta por dos o más sustancias.
- Modelo: Procedimiento matemático que permite simular la evolución de las variables de estado y demás propiedades de un sistema durante el desarrollo de un fenómeno físico o químico.
- Morfina: Alcaloide principal del opio, muy adictivo, con propiedades narcóticas y analgésicas muy potentes.
- NTP: Guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente.

- Peligro: Capacidad intrínseca de una sustancia peligrosa o potencialidad de una situación física para ocasionar daños a la salud humana, los bienes y el medio ambiente.
- Proyectiles: Fragmento sólido que procede de las inmediaciones del punto en el que se ha producido una explosión. En función de su origen, éstos se clasifican en proyectiles primarios, cuando proceden de una estructura que se encontraba en contacto con la masa explosiva, y secundarios, cuando proceden de estructuras cercanas a la zona de explosión que han sido fracturadas por la onda de sobrepresión.
- Rango de inflamabilidad: Intervalo de concentraciones de una mezcla inflamable comprendido entre los límites inferior y superior de inflamabilidad.
- Respuesta: Proporción de población afectada hasta un valor determinado para el efecto. Expresada en tanto por ciento o en tanto por uno.
- Riesgo: Probabilidad de que se produzca un efecto específico en un periodo de tiempo determinado o en circunstancias determinadas.
- Sustancia peligrosa: toda sustancia o mezcla incluida en la parte 1 o enumerada en la parte 2 del anexo I del Real Decreto 840/2015.
- Tiempo de exposición: Periodo de tiempo durante el cual se expone un material a una llama o a una fuente de calor.
- Toxicidad: Capacidad de una sustancia para producir daños genéticos, funcionales o psíquicos a los organismos vivos, cuando éstos la reciben por ingestión, inhalación de sus vapores o absorción cutánea.
- Tributirina: Medicamento triglicérido compuesto por tres ácidos butíricos con efectos beneficiosos sobre la colitis ulcerosa, ya que presenta propiedades tróficas, anti-inflamatorias, proapoptóticas y anti-cancerígenas.
- Umbral: Valor de una magnitud física peligrosa a partir de la cual se justifica la aplicación de una determinada medida de protección y que se emplea para definir los límites de las zonas objeto de planificación.
- Válvula de alivio: válvula automática para el alivio de presión, accionada por la presión en el lado de proceso de la misma y que se abre gradualmente cuando dicha presión supera la de consigna. Se emplea en tanques que almacenan líquidos.
- Zona de alerta: es aquella zona en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque son perceptibles por la población, no justifican la intervención excepto para grupos críticos de población.
- Zona de intervención: es aquella zona en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección.

ANEXO I. DISTANCIAS ENTRE LA PLANTA Y LAS POBLACIONES Y ESPACIOS NATURALES QUE LA RODEAN

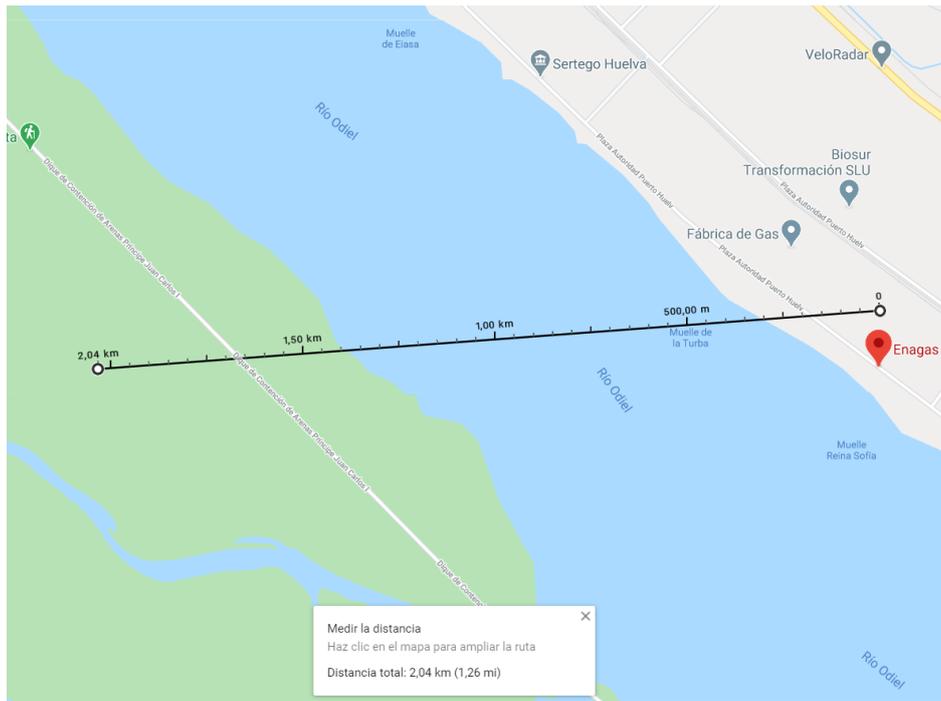
El presente anexo muestra la distancia existente entre la planta, ENAGÁS, y los diferentes núcleos de población y espacios naturales cercanos a la zona objeto de simulación.

I. Palos de la Frontera



Distancia: 6,43 kilómetros.

II. Paraje Natural Marismas del Odiel



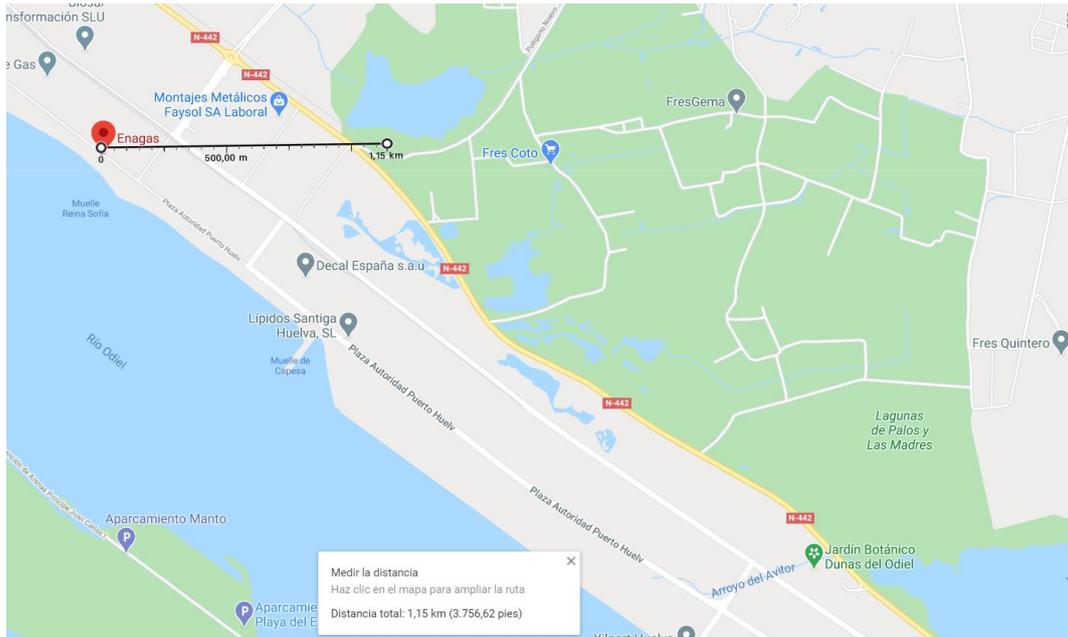
Distancia: 2,04 kilómetros.

III. Punta Umbría



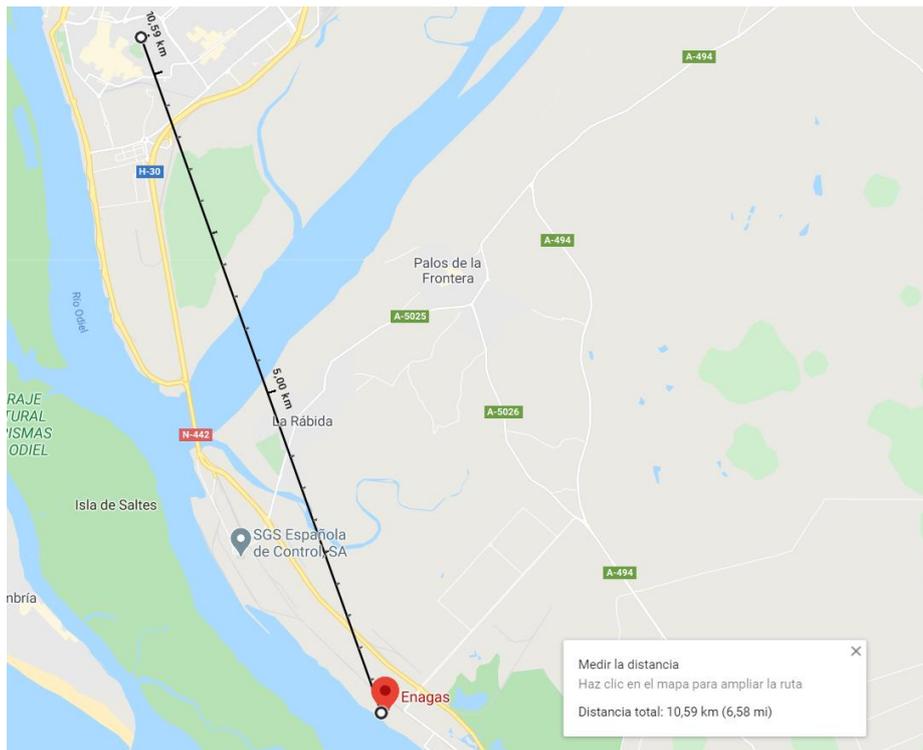
Distancia: 5,89 kilómetros.

IV. Lagunas de Palos y Las Madres



Distancia: 1,15 kilómetros.

V. Huelva



Distancia: 10,59 kilómetros.

ANEXO II: MANUAL ALOHA Y MARPLOT

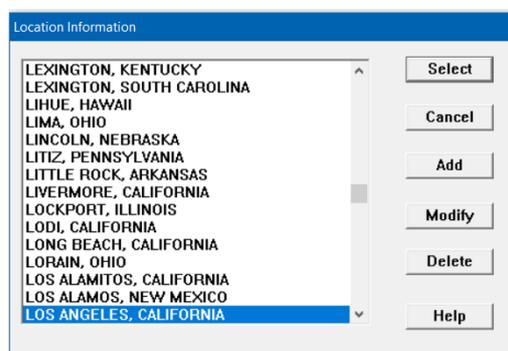
El presente anexo tiene por objeto plasmar el desarrollo de los accidentes, explicados anteriormente. Para ello, se mostrará paso a paso cómo se debe manejar el software ALOHA y MARPLOT.

1. Modelización de una nube tóxica

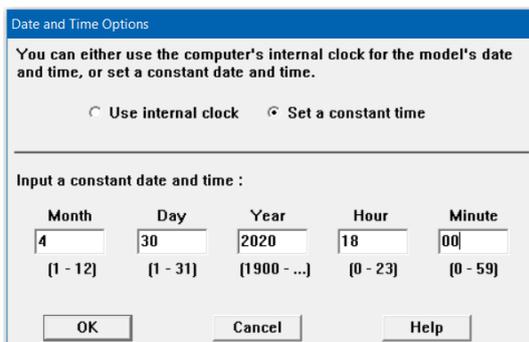
A. Selección de la localización de la planta, fecha y hora del accidente y sustancia química.

- 1) Para poder seleccionar la localización de la planta pulsar sobre el menú **SiteData**. Emerge una caja de información en la que ALOHA arroja una serie de nombres de diferentes ciudades. Seleccionar la más apropiada.

En este caso el parque industrial se encuentra situado en Palos de la Frontera, Huelva. Comparando la climatología de ambas zonas la zona más apropiada es Los Ángeles, California.



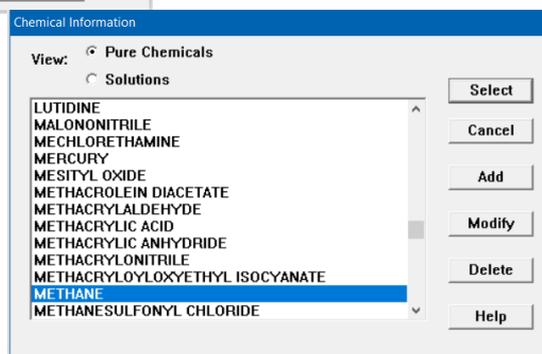
A continuación, se introduce la fecha en la cual se va a producir el accidente. Para ello se selecciona el menú **SiteData** y se pulsa sobre **Data & Time**.



ALOHA permite que se seleccione el momento exacto en el cual se está realizando la simulación o que se seleccione la fecha que se desee. En este caso se ha seleccionado el 30 de abril de 2020 a las 18:00.

- 2) Para seleccionar la sustancia química (metano), se selecciona **Chemical** del menú **SetUp**. Aparece una caja con información sobre distintas sustancias químicas.

Seleccionar **Pure Chemicals** al principio de la ventana emergente y localiza la sustancia metano.



B. Selección de la información meteorológica y rugosidad del terreno.

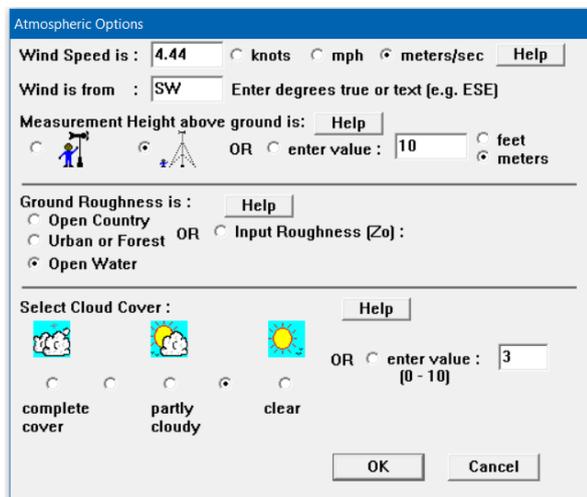
Una vez seleccionada la localización, la fecha y hora del accidente y la sustancia química, se procede a aportar la información meteorológica y la rugosidad del terreno.

- 1) En el menú **SetUp**, seleccionar **Atmospheric Options** y posteriormente **User Input**. Aparece la primera caja de diálogo.
- 2) Para poder completar esta caja de diálogo es necesario conocer los datos meteorológicos de la zona. Lo primero que se debe conocer es la velocidad del viento. En este caso la velocidad es de unos 16 km/h. Para poder insertar la velocidad ha realizado una conversión de km/h a m/s, quedando:

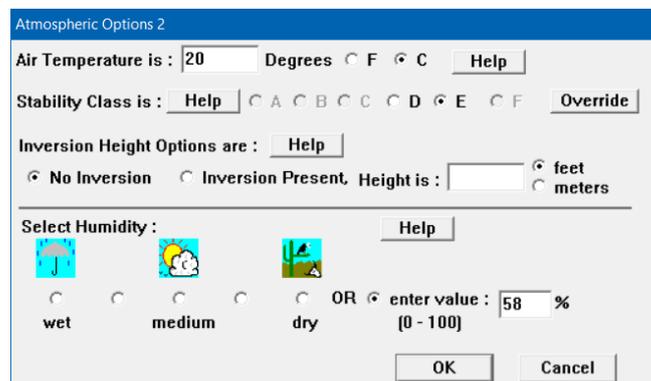
$$16 \frac{Km}{h} \times \frac{1000 m}{1 km} \times \frac{1 h}{3600 s} = 4,44 m/s$$

La segunda característica a tener en cuenta es la dirección del viento. Observando la rosa de los vientos de la zona, la dirección predominante es la de SW.

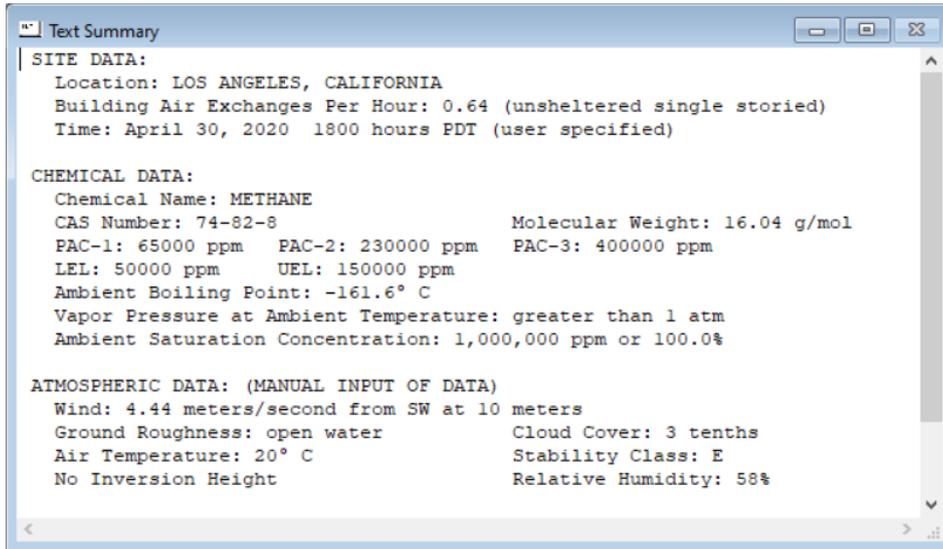
- 3) Las condiciones del viento son medidas a 10 metros de altura. Por ello, en el apartado **Measurement Height** se selecciona la segunda opción (icono de una torre). Se observa como ALOHA arroja una altura de 10 metros.
- 4) Hay pocos edificios en el parque industrial y mar abierto en la dirección suroeste (área donde el viento soplaría si se formase una nube tóxica). Por ello en **Ground Roughness** se selecciona **Open Water**.
- 5) El cielo se encuentra despejado con algunas nubes. En **Select Cloud Cover**, se selecciona la cuarta opción. Se selecciona **OK**.



- 6) La segunda ventana que emerge solicita información sobre la temperatura del aire, que en este caso es de 20°C.
- 7) ALOHA emplea la información sobre la velocidad del viento, la fecha y hora para seleccionar el tipo de estabilidad atmosférica, siendo esta E, que hacen referencia a una atmósfera ligeramente estable.
- 8) No existe inversión térmica.
- 9) La humedad relativa de la zona es del 58% (se selecciona la segunda opción comenzando por la izquierda).



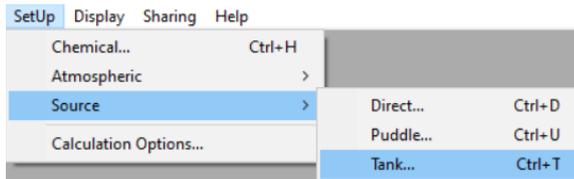
Toda la información introducida en ALOHA aparece en un cuadro de texto en forma de resumen.



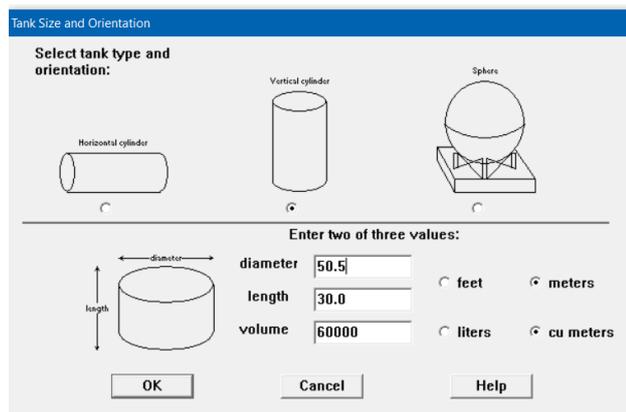
C. Descripción del accidente.

El siguiente paso a realizar es la introducción de la descripción del accidente.

- 1) El metano está fugando de un tanque. En el menú **SetUp**, se selecciona **Source**, y más concretamente **Tank**. Aparece un cuadro de diálogo sobre las medidas y orientación del tanque.



- 2) El tanque de metano almacena un volumen de 60.000 m³, con un diámetro de 50,5 metros y una altura de 30 metros. Tiene una orientación vertical, por lo que se debe seleccionar **Vertical Cylinder** (segunda opción).



- 3) El metano es almacenado en el tanque como un líquido a una temperatura de -161°C. Se seleccionan las opciones: **Tank contains liquid** y **Chemical stored at -161°C**.

Chemical State and Temperature

Enter state of the chemical: Help

Tank contains liquid
 Tank contains gas only
 Unknown

Enter the temperature within the tank: Help

Chemical stored at ambient temperature
 Chemical stored at degrees F C

OK Cancel

- 4) Al encontrarse el tanque lleno de metano, en la opción **Enter liquid level** se pone 60.000 m³. ALOHA arroja que el tanque contiene una masa de 25.306.947 kilogramos.

Liquid Mass or Volume

Enter the mass in the tank OR volume of the liquid

The mass in the tank is: pounds
 tons(2,000 lbs)
 kilograms

OR

Enter liquid level OR volume

The liquid volume is: gallons
 cubic feet
 liters
 cubic meters

% full by volume

OK Cancel Help

- 5) El metano se encuentra fugando del tanque debido a un orificio que se ha formado en el tanque. Este orificio es de 5 cm y se encuentra a una altura de 5 m. En este caso la fuga no encuentra un punto de ignición por lo que se forma una nube tóxica. Por ello, en el siguiente cuadro de diálogo se selecciona la opción 1 (**Leaking tank, chemical is not burning and forms an evaporating puddle**).

Area and Type of Leak

Select the shape that best represents the shape of the opening through which the pollutant is exiting

Circular opening Rectangular opening

Opening diameter: inches
 feet
 centimeters
 meters

Is leak through a hole or short pipe/valve?
 Hole Short pipe/valve

OK Cancel Help

Type of Tank Failure

Scenario:

Type of Tank Failure:

Leaking tank, chemical is not burning as it escapes into the atmosphere
 Leaking tank, chemical is burning as a jet fire
 BLEVE, tank explodes and chemical burns in a fireball

Height of the Tank Opening

liq.level

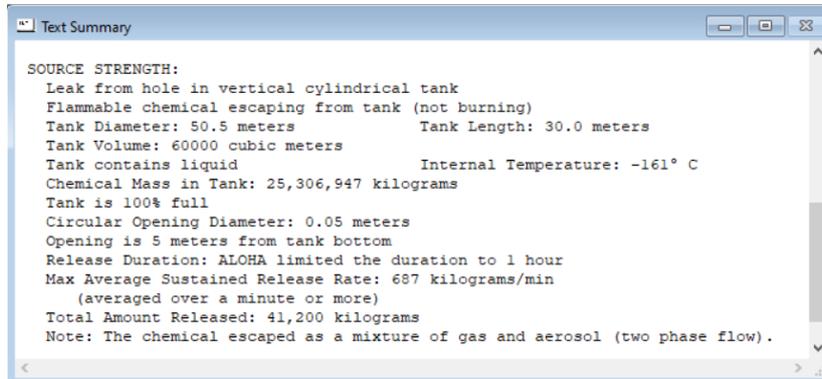
The bottom of the leak is:
 in ft cm m
 above the bottom of the tank

OR

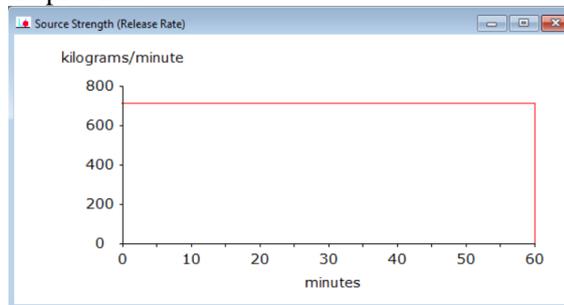
% of the way to the top of the tank

OK Cancel Help

La información sobre la fuente ingresada y los resultados de los cálculos que ALOHA ha realizado se muestran en el cuadro de texto. ALOHA estima que la liberación de vapor a la atmósfera durará una hora y la máxima cantidad fugada será de 687 kg/min.

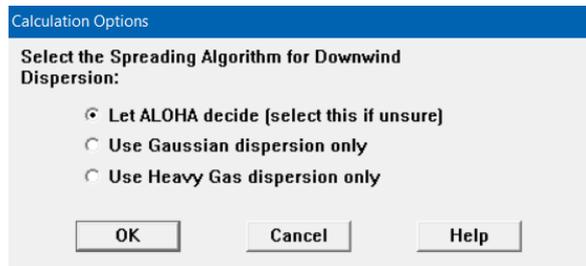


- 6) A continuación, seleccione la intensidad de la fuente en el menú **Display** → **Choose Source**, para ver el gráfico de intensidad de la fuente. El gráfico muestra la tasa de liberación promedio prevista.

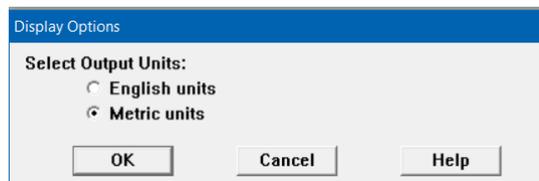


D. Comprobación del modelo empleado.

- 1) Seleccionar **Calculation Options** del menú **SetUp**. Se debe asegurar que la opción marcada sea: **Let ALOHA decide (select this if unsure)**.

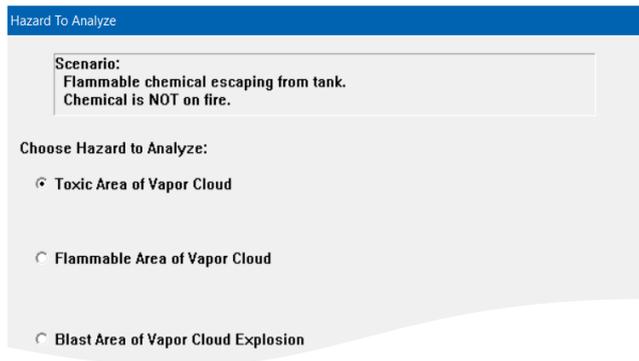


- 2) Selecciona **Display Options** del menú **Display**. Selecciona unidades métricas y los cálculos realizados por ALOHA se encontrarán en dichas unidades.

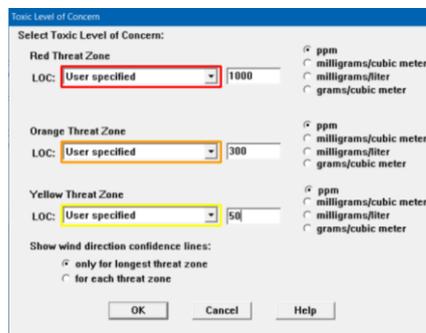


E. Selección de las Zonas de Amenaza.

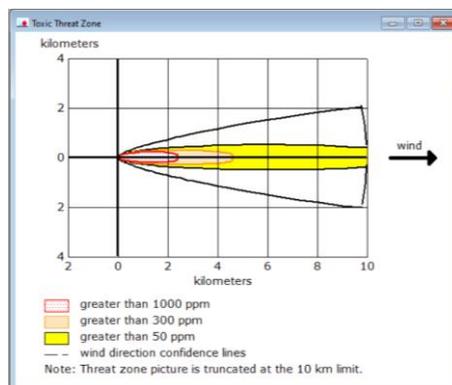
- 1) Selecciona **Threat Zone** del menú **Display**. Emerge un cuadro de peligro para analizar en el cual se debe seleccionar la opción de nube tóxica (**Toxic Area of Vapor Cloud**).



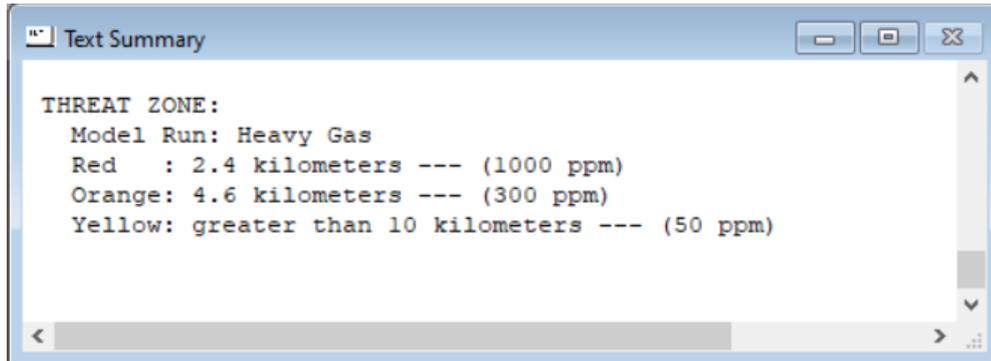
- 2) ALOHA permite que se seleccionen numerosos LOCs, entre ellos se encuentran: ERPG, AEGL, PAC, IDLH y por último permite que introduzcas uno específico. En este caso como se conocen los límites máximos a los cuales una persona puede estar expuesta, se empleará la opción **User specified**.



- 3) A continuación, emerge una ventana en la cual ALOHA ha estimado la zona de amenaza.



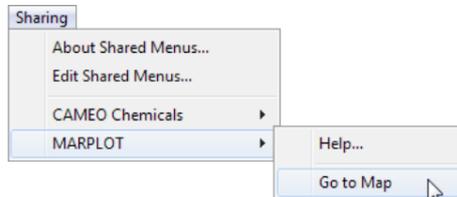
- 4) Chequeamos el texto resumen en el cual se indican las distancias que alcanzan cada una de las zonas estimadas.



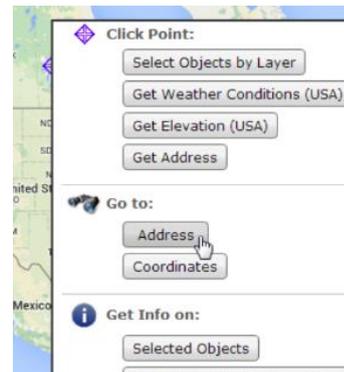
F. MARPLOT.

Una vez que las zonas de amenaza han sido calculadas pasamos a imponerlas sobre una imagen satelital. Para ello se emplea el software MARPLOT.

- 1) En ALOHA, selecciona del menú **Sharing** la opción **MARPLOT** y a continuación **Go to Map**. Es necesario que previamente hayas descargado la aplicación.



- 2) A continuación, se procede a la búsqueda en el mapa de la zona en el cual se produce el accidente. Haz click en el botón derecho de tu ratón sobre el mapa de **MARPLOT** y selecciona **Go To Address**.



- 3) A continuación, aparece una caja en la cual se inserta la dirección o las coordenadas de la planta industrial.

Go To Address

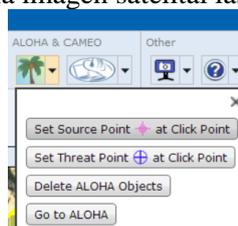
Type in as much of the address as you know. Separate parts of the address with commas.

Address:

Found:

Nominatim Search Courtesy of [MapQuest](#)

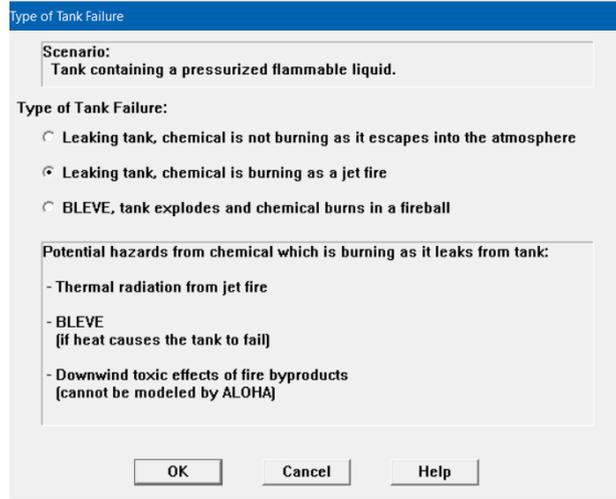
- 4) En el menú ALOHA y CAMEO, desplegamos el menú ALOHA y se inserta en primer lugar el punto de fuga y en segundo lugar se clicca sobre **Set Threat Point**. MARPLOT representa sobre la imagen satelital las distintas zonas de amenaza.



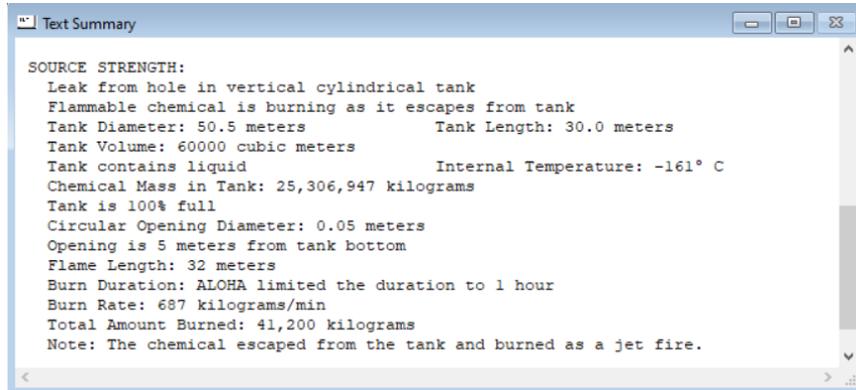
2. Modelización de un Jet Fire

Al igual que en el caso anterior la primera información que ALOHA solicita es la de: localización, fecha y hora, compuesto químico y condiciones atmosféricas.

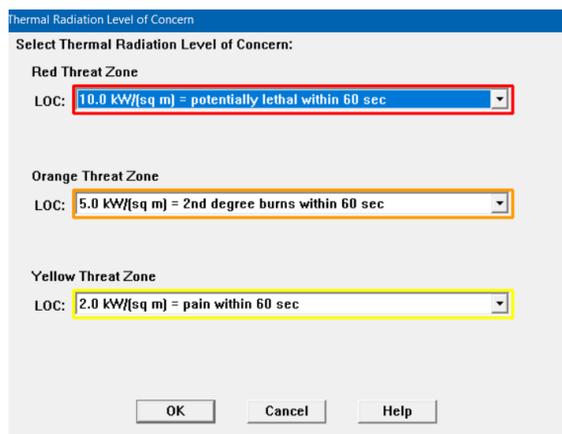
Una vez descrita la fuente para este escenario (de igual forma que el anterior), se debe indicar que el tanque está fugando, pero en este caso si está en llamas. Por ello, se debe seleccionar la segunda opción en la cual se indica que el tanque está fugando y la sustancia química se quema como un dardo de fuego (**Leaking tank, chemical is burning as a jet fire**).



La siguiente información solicitada por ALOHA continúa siendo la misma, es decir, la fuga se produce como consecuencia de un agujero de 5 centímetros a 5 metros de altura del tanque.



El siguiente paso a realizar es la introducción de los límites de las distintas zonas de amenaza. Para ello, se selecciona en el menú **Display** la opción **Threat Zone**.



Finalmente, se representa los distintos límites en MARPLOT.

3. Modelización de una nube tóxica con efecto dominó

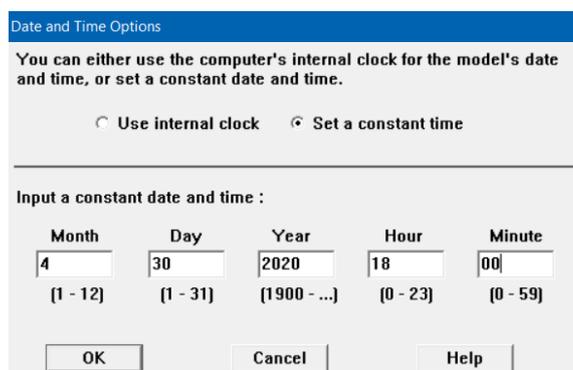
En esta opción, ALOHA evalúa las posibles amenazas como consecuencia de una fuga en el tanque.

A. Selección de la localización de la planta, fecha y hora del accidente y sustancia química.

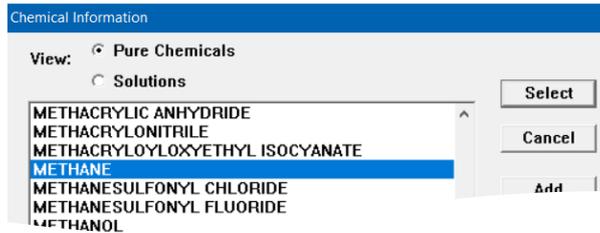
- 1) Selecciona **Location** del menú **SiteData**. Una caja de diálogo aparece con una lista que contiene nombres de distintas ciudades.



- 2) A continuación, selecciona **Date & Time** del menú **SiteData**. Como el accidente ocurre el 30 de abril de 2020 a las 18:00 horas, selecciona la opción **set a constant time** e introduce los datos.



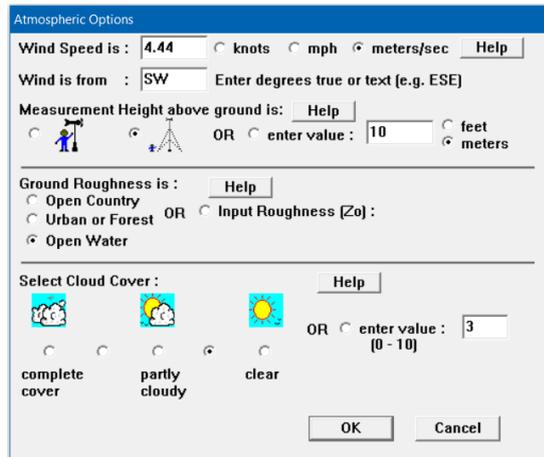
- 3) Para la insertar en ALOHA la sustancia química contenida en el tanque, selecciona **Chemical** del menú **SetUp**. Selecciona **Pure Chemicals** en la parte superior de la ventana. Busca la sustancia química denominada **METANO** entre la lista y haz click sobre **Select**.



B. Selección de la información meteorológica y rugosidad del terreno.

1) En el menú **SetUp** haz click sobre **Atmospheric**, a continuación, selecciona **User Input**.

2) El viento viaja a una velocidad de 4,44 m/segundo en la dirección SW (inserte dichos datos en la caja de diálogo). Además, las condiciones del viento han sido medidas a una altura de 10 metros.

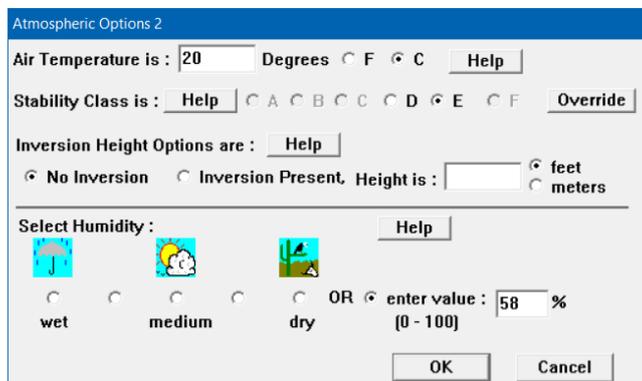


3) El área que rodea la instalación en la dirección del viento SW es el mar por lo que se selecciona la opción de **Open Water**.

4) En cuanto al cielo, este se encuentra despejado con alguna nube por lo tanto se selecciona la cuarta opción.

5) La temperatura del aire es de 20°C. Inserta 20 y selecciona la opción C en **Degrees**.

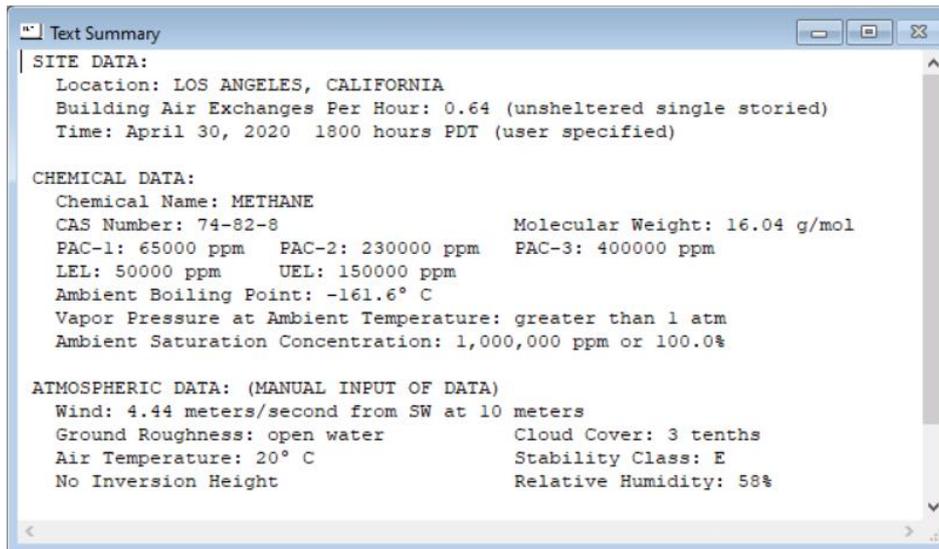
6) ALOHA, emplea la información aportada sobre la velocidad del viento, la nubosidad, la fecha y hora para determinar el tipo de estabilidad atmosférica, que en este caso es C.



7) Como en este caso no se produce durante el día ningún tipo de inversión térmica, se selecciona la opción de **No Inversion**.

8) En cuanto a la humedad relativa, el valor medio en el mes de abril es de un 58%, inserte dicho dato y haga click en **OK**.

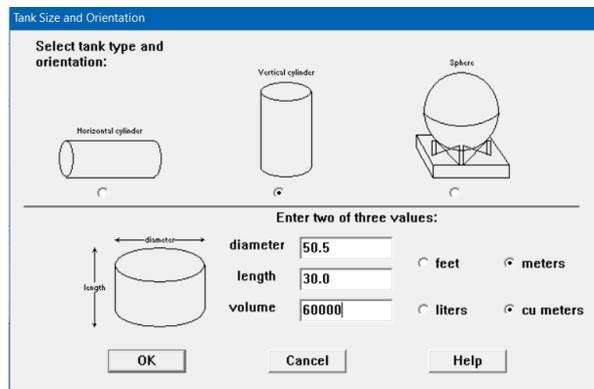
A continuación, aparece un texto resumen con toda la información que ha sido insertada.



C. Descripción de la liberación.

Una vez agregada toda la información anterior, ya se puede pasar al siguiente paso que consiste en la descripción de la liberación.

- 1) El metano se encuentra almacenado en un tanque. En el menú **SetUp**, selecciona **Source** y a continuación haz click sobre **Tank**.
- 2) El tanque almacena un volumen de 60.000 m³, tiene una altura de 30 metros y un diámetro de 50,5 metros. El tanque es vertical. Una vez agregada toda la información en el cuadro de diálogo haz click sobre **OK** y emergerá un cuadro que solicita información sobre la sustancia química y su temperatura.



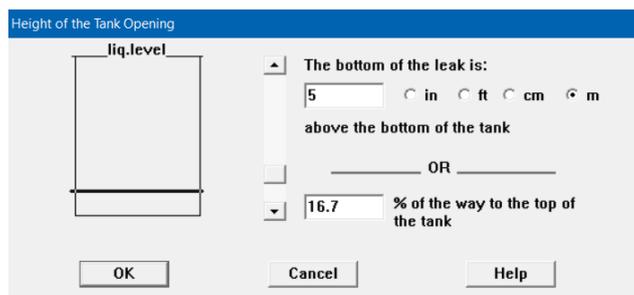
- 3) El metano es almacenado en el tanque como líquido, es decir, el tanque contiene gas natural licuado. Selecciona la opción **Tank contains liquid**. Comprobada a que temperatura se encuentra la sustancia química, en este caso el gas natural se encuentra almacenado a -161°C, por ello selecciona la opción **Chemical stored at -161°C**.

- 4) A continuación, emerge un cuadro de diálogo en el que ALOHA solicita información sobre la masa y el volumen de la sustancia química almacenada en el tanque. Selecciona la opción kilogramos y metros cúbicos e inserta el volumen. ALOHA arroja el valor correspondiente a la masa.

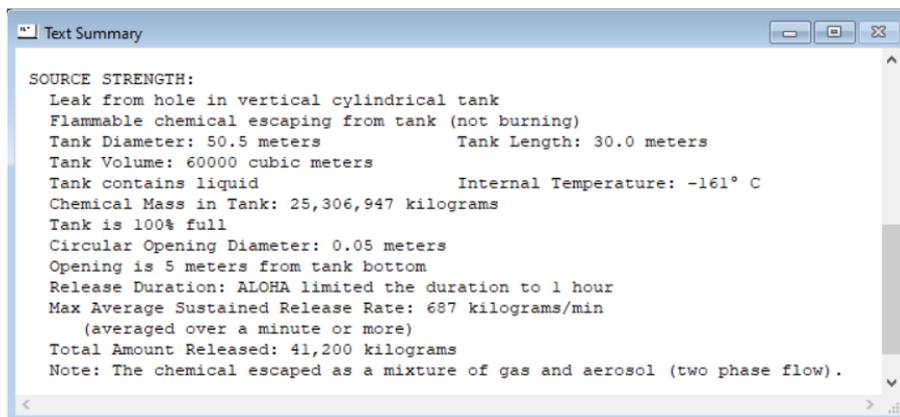
- 5) Como se está simulando un accidente con efecto dominó, se debe seleccionar la primera opción (**Leaking tank, chemical is not burning as it escapes into the atmosphere**).

- 6) A continuación, aparece un cuadro de diálogo que solicita información sobre el área y tipo de fuga que se ha originado. En este caso se produce un agujero circular de 5 cm de diámetro.

- 7) Finalmente, ALOHA solicita información sobre la altura a la cual se está produciendo la fuga, que en este caso es a los 5 metros.

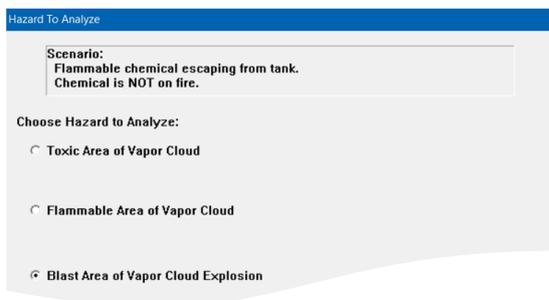


La información sobre la fuerza de la fuente a la cual la sustancia química se encuentra fugando se muestra a continuación.



D. Selección de las zonas de amenaza.

- 1) Selecciona **Threat Zone** del menú **Display**.
- 2) ALOHA permite modelar tres posibles escenarios peligrosos para la nube de vapor inflamable: área tóxica, área inflamable o área de explosión. Para este caso, se selecciona la opción **Blast Area of Vapour Cloud Explosion**. El área inflamable es el área prevista donde la concentración a nivel del suelo en el aire está dentro del rango de inflamabilidad. Además, emplea la estimación de la zona de amenaza para determinar posibles fuentes de ignición y el nivel de congestión dentro de la nube de vapor.
- 3) A continuación, emerge un cuadro de diálogo en el que ALOHA solicita unos determinados parámetros relacionados con el accidente. Si no se sabe la hora a la cual se produce la ignición, selecciona la opción **unknown (show composite threat zone from all possible ignition times)**. Como el accidente ocurre en un área industrial se supone que la ignición se produce por una chispa mecánica, por ello seleccione **ignited by spark or flame**.
- 4) El área en la dirección del viento tomada (SW) se encuentra congestionada, ya que atraviesa una zona de tubería y otros equipos. Selecciona la opción **congested, difficult to walk through**.



Vapor Cloud Explosion Parameters

Time of vapor cloud ignition: Help

unknown (show composite threat zone from all possible ignition times)
 known, ignition time is :

Type of vapor cloud ignition: Help

ignited by spark or flame
 ignited by detonation

Level of congestion : Help
(in the flammable part of the vapor cloud)

congested, difficult to walk through (e.g. pipe rack, dense forest)
 uncongested, easy to walk through (e.g. residential neighborhood)

OK Cancel

- 5) Finalmente, selecciona las distintas zonas de amenaza. En este caso se ha tenido en cuenta los valores recogidos en el REAL DECRETO 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas. Estos valores son: para zona amarilla 0,049 atm, para la zona naranja 0,123 atm y para la zona roja 0,158 atm.

Overpressure Level of Concern

Select Overpressure Level of Concern:

Red Threat Zone
LOC: User specified psi
0.158 atm Pa

Orange Threat Zone
LOC: User specified psi
0.123 atm Pa

Yellow Threat Zone
LOC: User specified psi
0.049 atm Pa

Show wind direction confidence lines:
 only for longest threat zone
 for each threat zone

OK Cancel Help

Finalmente, a través del cuadro resumen se puede ver las distancias que alcanzan cada zona.

Text Summary

```

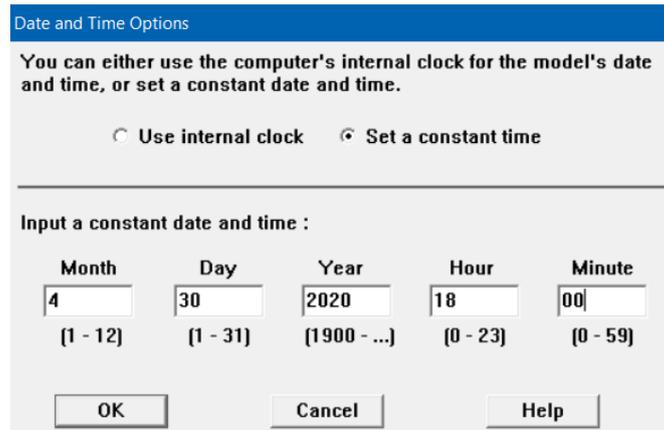
THREAT ZONE:
Threat Modeled: Overpressure (blast force) from vapor cloud explosion
Type of Ignition: ignited by spark or flame
Level of Congestion: congested
Model Run: Heavy Gas
Red : 53 meters --- (0.158 atmospheres)
Orange: 55 meters --- (0.123 atmospheres)
Yellow: 79 meters --- (0.049 atmospheres)

```

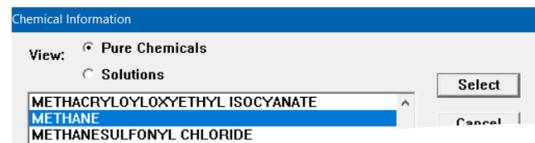
4. Modelización de una BLEVE.

A. Selección de la localización y sustancia química.

- 1) Haz click sobre **Location** del menú **SiteData**. Aparece una caja de diálogo con nombres de ciudades. Selecciona **LOS ANGELES, CALIFORNIA** y haz click sobre **Select**.
- 2) A continuación, haz click sobre la opción **Data & Time** del menú **SiteData**. Como el accidente se produce el 30 de abril del 2020 a las 18.00 horas, selecciona la opción **Set a constant time** e introduce el año, mes, día y hora.

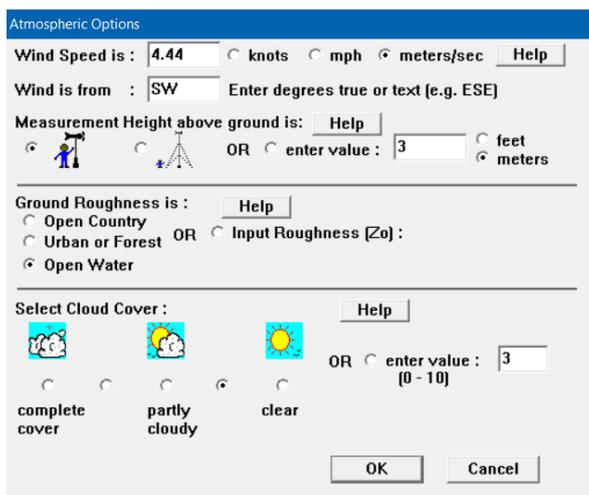


- 3) Para la selección de la sustancia química, metano, selecciona **Chemical** del menú **SetUp**. Selecciona la opción de **Pure Chemical** y busca en la lista **Methane**, después haz click sobre **Select**.

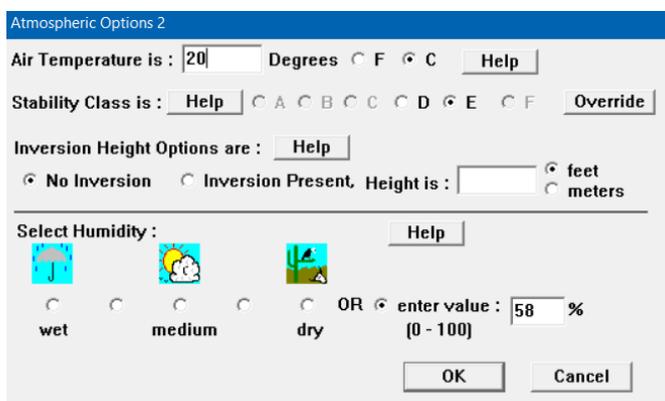


B. Introducción la información meteorológica y la rugosidad del suelo.

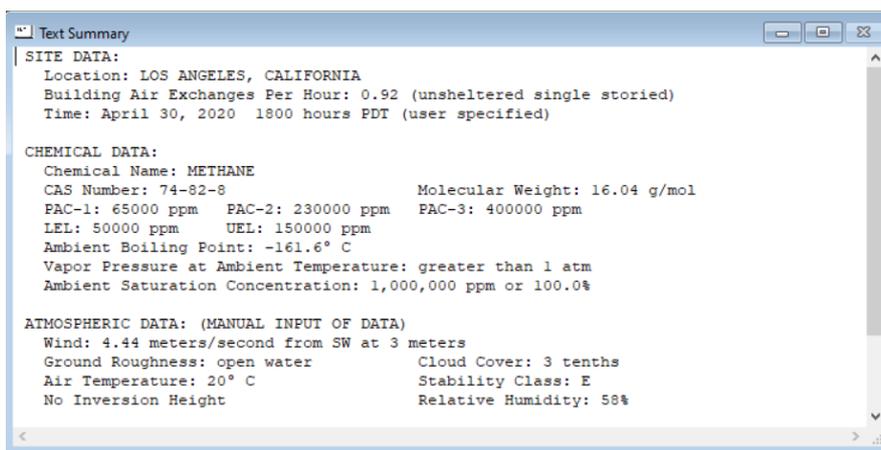
- 1) Del menú **SetUp** selecciona la opción **Atmospheric** y a continuación, la opción **User Input**.
- 2) El viento viaja en dirección SW a una velocidad de 4,44 m/s. Estos datos han sido medidos a una altura de 10 m, por tanto, selecciona el icono de torre.
- 3) El área alrededor del tanque en dicha dirección del viento es mar abierto. Selecciona **Open Water** en la opción de rugosidad del terreno.
- 4) En cuanto a la cobertura nubosa el cielo se encuentra relativamente claro, por lo que se selecciona la cuarta opción.



- 5) La temperatura del aire es de 20°C. Introduce 20 en la caja de **Air Temperature** y selecciona °C.
- 6) ALOHA emplea la velocidad del viento, la cobertura nubosa, la fecha y hora y la rugosidad del terreno para determinar qué tipo de estabilidad atmosférica hay en el momento en que se produce el accidente.
- 7) No existe inversión térmica.
- 8) La humedad relativa es del 58%.



La información anteriormente aportada aparece en un cuadro resumen que se muestra a continuación:



C. Descripción del accidente.

- 1) El metano se encuentra almacenado en un tanque vertical. En el menú **SetUp**, selecciona las opciones **Source** y **Tank**.
- 2) El tanque almacena 11.000 m³ de metano, con un diámetro de 30 m y una altura de 15,6 m. Introduce todos estos datos en la caja de diálogo que ha emergido.

Tank Size and Orientation

Select tank type and orientation:

Horizontal cylinder Vertical cylinder Sphere

Enter two of three values:

diameter length volume

feet meters
 liters cu meters

- 3) El metano es almacenado en el tanque como un líquido y a una temperatura de -161°C . Selecciona la opción **Tank contains liquid** e introduce -161°C .

Chemical State and Temperature

Enter state of the chemical: Tank contains liquid Tank contains gas only Unknown

Enter the temperature within the tank:

Chemical stored at ambient temperature
 Chemical stored at degrees F C

- 4) Como no se sabe el nivel exacto de llenado del tanque y se quiere estimar la peor situación, se introduce el volumen máximo que puede almacenar el tanque (11.000 m^3) y ALOHA arroja directamente la masa que contiene el tanque.

Liquid Mass or Volume

Enter the mass in the tank OR volume of the liquid

The mass in the tank is: pounds tons(2,000 lbs) kilograms

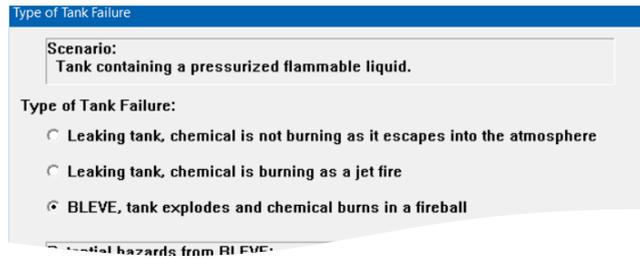
OR

Enter liquid level OR volume

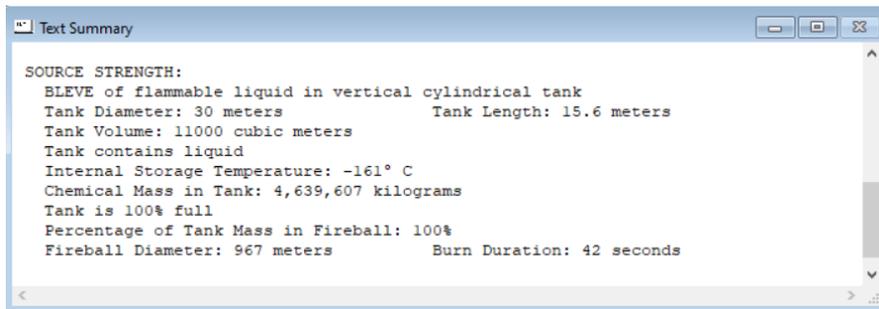
The liquid volume is: gallons cubic feet liters cubic meters

% full by volume

- 5) Se quiere modelar un escenario en el cual se produzca una BLEVE. Selecciona la opción **BLEVE, tank explodes and chemical burns in a fireball**.

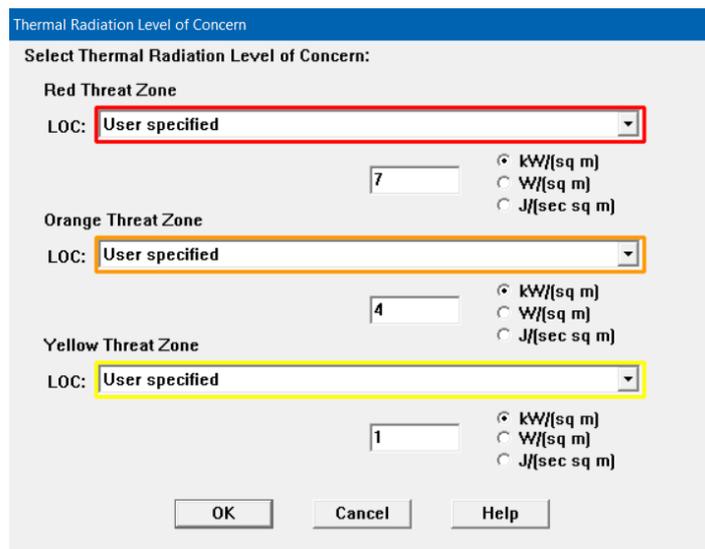


Toda la información introducida anteriormente aparece de forma resumida en el cuadro de texto que se muestra a continuación.

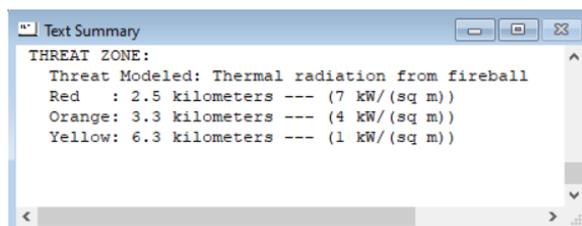


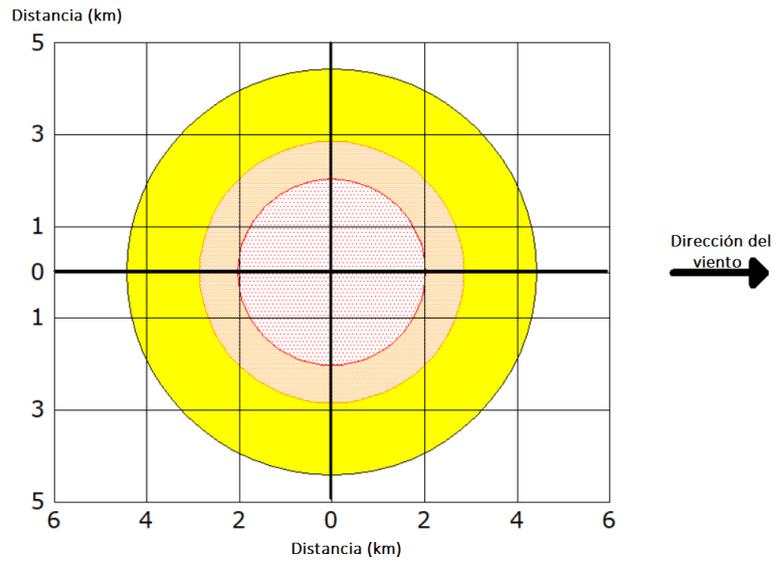
D. Selección de las zonas de amenaza.

- 1) Selecciona Threat Zone del menú Display.
- 2) Como se conoce cuál es la radiación máxima tolerable por el tanque, se introducen dichos valores para cada una de las zonas.



Finalmente, en el cuadro resumen aparece las distintas zonas de amenaza y la distancia que alcanzan cada una de ellas.





-  Mayor que 10 kW/m² (potencialmente letal en 60 segundos).
-  Mayor que 5 kW/m² (quemaduras de segundo grado en 60 segundos).
-  Mayor que 2 kW/m² (dolor en 60 segundos).