

ANEXO L

Análisis de consecuencias

Índice

1. Metodología para el cálculo de consecuencias	1
1.1. Fugas y evaporaciones	2
1.1.1. Hipótesis y limitaciones	3
1.1.2. Datos necesarios	4
1.1.3. Descripción.....	5
1.2. Explosión de nubes de vapor no confinadas, UVCE.....	6
1.2.1. Hipótesis y limitaciones	6
1.2.2. Datos necesarios.....	6
1.2.3. Descripción.....	7
1.3. Incendio de charco	7
1.3.1. Hipótesis y limitaciones	7
1.3.2. Datos necesarios.....	8
1.3.3. Descripción.....	8
1.4. Dardo de fuego.....	8
1.4.1. Hipótesis y limitaciones	9
1.4.2. Datos necesarios.....	9
1.4.3. Descripción.....	10
1.5. BLEVE	10
1.5.1. Bolas de fuego.....	11
1.5.2. Estallido de recipientes.....	12
1.6. Dispersión de una nube.....	13
1.6.1. Hipótesis y limitaciones	13
1.6.2. Datos necesarios.....	14
1.6.3. Descripción.....	14
1.7. Explosión química	15
1.7.1. Hipótesis y limitaciones	16
1.7.2. Datos necesarios.....	16
1.7.3. Descripción.....	16
1.8. Metodología Probit	17
1.8.1. Hipótesis y limitaciones	17
1.8.2. Descripción.....	18

2. Definición de las zonas objeto de planificación	20
2.1. Naturaleza del riesgo	20
2.2. Naturaleza del daño	20
2.2.1. Fenómenos mecánicos peligrosos	21
2.2.2. Fenómenos térmicos peligrosos.....	22
2.2.3. Fenómenos químicos peligrosos.....	22
2.3. Análisis de vulnerabilidad de personas y bienes	23
2.3.1. Variables peligrosas para las personas y bienes.....	23
2.3.2. Análisis de consecuencias	26
2.3.3. Definición de las zonas objeto de planificación: valores umbrales...26	
3. Análisis de consecuencias en el transporte de mercancías peligrosas por carretera en La Rioja	29
ONU 1010: Butadienos estabilizados o butadienos e hidrocarburos en mezcla estabilizada.....	29
ONU 1017: Cloro	35
ONU 1090: Acetona.....	38
ONU 1202: Gasóleo o combustible para motores diesel o aceite mineral para caldeo, ligero (punto de inflamación no sobrepase los 60 °C)	41
ONU 1203: Combustible para motores o gasolina	45
ONU 1131: Disulfuro de carbono	49
ONU 1170: Etanol.....	54
ONU 1173: Acetato de etilo.....	58
ONU 1230: Metanol	62
ONU 1789: Ácido clorhídrico.....	67
ONU 1791: Hipocloritos en solución.....	68
ONU 1824: Hidróxido sódico en solución.....	70
ONU 1830: Ácido sulfúrico conteniendo más del 51% de ácido	71
ONU 1965: Mezcla de hidrocarburos gaseosos licuados, n.e.p.	72

Propano.....	74
Butano.....	79
ONU 2014: Peróxido de hidrógeno en solución acuosa.....	84
ONU 2031: Ácido nítrico, excepto el ácido nítrico fumante rojo, con más del 70% ácido nítrico.....	87
ONU 2055: Estireno monómero estabilizado.....	90
ONU 2304: Naftaleno fundido.....	94
4. Análisis de consecuencias en el transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril en La Rioja.....	99
ONU 1010: Butadienos estabilizados o butadienos e hidrocarburos en mezcla estabilizada.....	99
ONU 1052: Fluoruro de hidrógeno anhidro.....	106
ONU 1093: Acrilonitrilo estabilizado.....	109
ONU 1131: Disulfuro de carbono.....	114
ONU 1547: Anilina.....	119
ONU 1824: Hidróxido sódico en solución.....	122
ONU 1830: Ácido sulfúrico conteniendo más del 51% de ácido.....	123
ONU 2015: Peróxido de hidrógeno.....	125

1. Metodología para el cálculo de consecuencias

Un determinado accidente puede considerarse como la concatenación de sucesos, lo que conduce a la generación de efectos perjudiciales para el hombre o el medio ambiente. Cada uno de estos fenómenos puede ser simulado mediante modelos numéricos de cálculo independientes. El correcto acoplamiento entre los citados modelos permite la determinación de las consecuencias de los accidentes. Para cada uno de los modelos numéricos se adopta la siguiente estructura:

- ◇ Método: se describen los fundamentos físicos y químicos del método.
- ◇ Hipótesis y limitaciones: se describen las limitaciones del método, así como las hipótesis que comporta. La aplicación del método en una situación que no se ajuste a sus hipótesis y limitaciones puede producir resultados erróneos.
- ◇ Datos necesarios: se describen los datos necesarios para la aplicación del modelo.
- ◇ Aplicación y resultados: se describen los criterios que se utilizarán para aplicar este método en el ámbito del análisis de consecuencias y para relacionarlo con los restantes modelos. Asimismo, se describen los resultados proporcionados por el modelo.

El estudio de las consecuencias de un accidente puede comprender uno o varios de los siguientes pasos:

- ◇ Determinación del caudal de fuga (líquido o gas) de un recipiente.
- ◇ Determinación de la cantidad de vapor generado directamente (fuga de gas) o por evaporación (fuga de líquido).
- ◇ Estudio de la dispersión de la nube formada (posible nube tóxica, incendio de nube o UVCE).
- ◇ Cálculo de la sobrepresión causada por la deflagración de la misma (UVCE).

- ◊ Cálculo de la extensión del charco formado (fuga de líquido) y alcance de la radiación en caso de incendio.
- ◊ Cálculo de la geometría del dardo y alcance de la radiación en el caso de incendio tipo dardo de fuego.
- ◊ Cálculo de concentración de la sustancia tóxica.
- ◊ Cálculo de las consecuencias de un BLEVE (radiación, sobrepresión y proyección de fragmentos).
- ◊ Cálculo de la sobrepresión causada por una explosión química.
- ◊ Cálculo de las consecuencias mediante la metodología Probit.

A continuación se describen los modelos matemáticos utilizados, sin presentar las formulaciones matemáticas de los mismos.

1.1. Fugas y evaporaciones

Se entiende por fuga la salida incontrolada de materias de continentes que hayan de ser estancos, excepto a través de conexiones bajo control, lo que puede ocurrir por la aparición de un orificio limitado o por una rotura catastrófica del continente.

Atendiendo a distintos criterios, las fugas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ◊ Dependiendo de la duración se puede tener:
 - ◆ Fuga instantánea: colapso del continente con un vertido muy rápido de su contenido.
 - ◆ Fuga continua: pérdida del contenido a través de fisuras o perforaciones.
- ◊ Dependiendo del estado del fluido:
 - ◆ Fuga de líquido: derrame de una sustancia que permanece líquida durante la fuga.
 - ◆ Fuga de vapor: escape del vapor en equilibrio con un líquido.
 - ◆ Fuga de gas: escape de una sustancia gaseosa.
- ◊ Dependiendo de los procesos de transferencia de energía:
 - ◆ Fuga adiabática: sin transferencia de calor con el exterior. Se produce cuando el fluido sufre grandes cambios de densidad muy rápidamente o cuando el recipiente está térmicamente aislado.

- ♦ Fuga isoterma: sin cambio de temperatura. Suele ocurrir en tres situaciones: cuando no hay cambios importantes de densidad (líquidos), cuando el proceso es lento y el fluido en el recipiente tiene una inercia térmica suficiente o cuando la presión en el recipiente se mantiene casi constante durante la fuga.

El objetivo principal de un modelo de fugas adecuado consiste en describir correctamente dos variables:

- ♦ la cantidad de fluido liberada, y
- ♦ las condiciones de presión y temperatura de la sustancia fugada.

Por otro lado, el cambio de estado físico, de líquido a gas, es lo que se entiende por vaporización de un líquido. Los modelos matemáticos predicen la cantidad de gas o vapor que se desprende de un derrame de líquido en determinadas condiciones de presión, temperatura, velocidad del viento, tipo de suelo, etc.

La evaporación depende del tipo de sustancia fugada. Así pues, hay que diferenciar entre tres tipos:

- ♦ Evaporación de líquidos sobrecalentados. Cuando escapa un gas licuado bajo presión, éste es un líquido sobrecalentado, pues está a una temperatura (temperatura ambiente) mayor que su temperatura de ebullición. La caída de presión que sigue a la fuga, provoca que el líquido hierva, de modo que parte del mismo se vaporiza instantáneamente (evaporación flash o súbita).
- ♦ Evaporación de líquidos hirvientes. Cuando escapa un gas licuado por enfriamiento o un gas licuado por compresión, una vez que ha ocurrido la evaporación súbita o flash, y entra en contacto con el terreno tiene lugar una transferencia de calor desde éste hacia el líquido, causante de la evaporación.
- ♦ Evaporación de líquidos no hirvientes. Cuando se produce el derrame de un líquido con un punto de ebullición mayor que la temperatura ambiente, pero que en el momento de la descarga se encuentra a una temperatura inferior a la de ebullición, se produce un charco y la evaporación se produce como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco y la que existe en los alrededores.

1.1.1. Hipótesis y limitaciones

Se considera que no existen salidas ni entradas de fluidos diferentes a las de la fuga, ni gradientes de temperatura en el fluido.

El orificio de fuga se asimila a uno circular cuyo diámetro es pequeño respecto al diámetro hidráulico del recipiente y grande respecto al espesor de la pared.

Los gases y vapores se comportan como gases perfectos y los líquidos son considerados como sustancias puras.

1.1.2. Datos necesarios

Los datos a suministrar para la aplicación de los modelos de cálculo de fugas y evaporación son:

- ◇ Datos de la sustancia afectada.
 - ◆ Sustancia líquida
 - ▶ Peso molecular
 - ▶ Temperatura de ebullición
 - ▶ Densidad del líquido
 - ▶ Densidad del vapor
 - ▶ Relación de calores específicos
 - ▶ Entalpía de vaporización
 - ▶ Presión de vapor a temperatura ambiente
 - ◆ Sustancia gaseosa
 - ▶ Peso molecular
 - ▶ Temperatura de ebullición
 - ▶ Densidad del vapor
 - ▶ Relación de calores específicos
 - ▶ Densidad del líquido
 - ▶ Calor específico del líquido
 - ▶ Entalpía de vaporización
 - ▶ Presión de saturación

Estas últimas cuatro propiedades deben ser evaluadas en todo el intervalo de temperaturas de trabajo, en el caso de que la sustancia gaseosa se encuentre licuada bajo presión.
- ◇ Datos de los recipientes
 - ◆ Dimensiones del recipiente (volumen, longitud)
 - ◆ Presión inicial en el recipiente
 - ◆ Temperatura en el interior del recipiente
 - ◆ Altura inicial de líquido (si hay)
- ◇ Datos de la fuga
 - ◆ Diámetro del orificio de salida
 - ◆ Coeficiente de contracción de la vena fluida
 - ◆ Temperatura ambiente

- ◆ Velocidad del viento
- ◆ Conductividad y difusividad del sustrato
- ◆ Tipo de limitación física a la expansión del charco.

1.1.3. Descripción

Existe un gran número de casos a estudiar. Teniendo en cuenta las condiciones de la fuga y otros parámetros, se pueden subdividir los modelos de la siguientes manera:

1. Fuga de líquido.

Fuga isoterma de líquido.
Fuga adiabática de líquido.

2. Fuga de gas/vapor.

Fuga isoterma de gas/vapor.
Depósito (esférico, vertical u horizontal).

Fuga adiabática de gas/vapor.
Depósito (esférico, vertical u horizontal).

3. Evaporación de charco.

Líquidos hirvientes (temperatura de ebullición inferior a la temperatura ambiente).

Líquidos no hirvientes (temperatura de ebullición superior a la temperatura ambiente).

Para los casos de fuga de líquido, el objetivo es calcular el **caudal de salida** en cada instante a partir de la relación de Bernoulli. Para ello, se necesita conocer la presión y densidad del líquido y la altura del mismo sobre el orificio de salida.

Para los casos de **fuga isoterma**, la presión va a ser constante e igual a la presión atmosférica, por lo que la ecuación se simplifica notablemente. Además el caudal de fuga está directamente relacionado con la variación del nivel de líquido, a través de la sección transversal del continente.

En los casos de **fuga adiabática**, además de variar el nivel de líquido, también variará la presión en el interior, por lo que la resolución se complica. Pero considerando los fenómenos físicos que ocurren a medida que se derrama líquido (expansión de vapor y evaporación de líquido) y planteando un balance de energía, se puede obtener el caudal de salida en cada instante.

En el caso 2, se obtienen los caudales de fuga partiendo de la ecuación de fuga de gas a través de un orificio, planteando las condiciones de isoterma o adiabática, tal y como se ha hecho en el caso 1.

Para el caso 3 (evaporación de charco), existen dos modelos que distinguen entre líquidos hirvientes y no hirvientes. En ambos casos, se trata de calcular el **caudal instantáneo de evaporación de charco** por unidad de superficie y por unidad de tiempo.

Para **líquidos hirvientes**, este caudal viene dado por la entalpía de vaporización del líquido y por las propiedades térmicas del sustrato.

Para **líquidos no hirvientes**, el caudal de evaporación es proporcional al logaritmo natural de la diferencia unitaria entre la presión de vapor y la presión atmosférica.

1.2. Explosión de nubes de vapor no confinadas, UVCE

Las explosiones que se consideran aquí son las denominadas explosiones de nubes de vapor no confinadas, traducción de la expresión inglesa "*unconfined vapour cloud explosion*", y de ahí su acrónimo UVCE, que se utilizará de ahora en adelante.

Este tipo de explosiones se originan debido a un escape de gran cantidad de gas o vapor inflamable o por una evaporación rápida de un líquido inflamable para formar una nube de características inflamables mezclada con el aire. Cuando un gas inflamable se encuentra con una fuente de ignición, una parte de esta masa de gas deflagra y se produce la explosión.

El modelo parte de los resultados que se derivan de la dispersión de los vapores inflamables. El modelo utilizado es el "Modelo de Sachs", basado en una correlación entre la sobrepresión directa máxima y la energía liberada en la deflagración.

1.2.1. Hipótesis y limitaciones

Este modelo es aplicable únicamente para valores de la energía total liberada en la deflagración menores de $5 \cdot 10^{12}$ J (explosión no confinada de, aproximadamente, 100 toneladas de un hidrocarburo gaseoso).

1.2.2. Datos necesarios

- ◇ Datos de la sustancia
 - ◆ Densidad del gas en condiciones normales
 - ◆ Energía de combustión
 - ◆ Límite superior de inflamabilidad
 - ◆ Límite inferior de inflamabilidad

- ◆ Concentración estequiométrica de la sustancia que deflagra
- ◆ Constante de reactividad
- ◆ Datos meteorológicos y del terreno
 - ◆ Categoría de estabilidad atmosférica
 - ◆ Coeficiente de rugosidad del terreno

1.2.3. Descripción

Las variables que se determinan son las siguientes:

- ◆ En primer lugar, se determina la longitud característica de Sachs.
- ◆ Se calcula entonces la sobrepresión máxima directa relativa de Sachs.
- ◆ A partir de la sobrepresión de Sachs, puede determinarse la sobrepresión máxima directa.

1.3. Incendio de charco

Como consecuencia de un derrame, fuga o escape de líquidos inflamables se forma un charco de líquido cuya extensión dependerá de la geometría y naturaleza del suelo. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

El modelo matemático para la predicción de la distribución de radiación térmica se basa en la utilización de ecuaciones semiempíricas clásicas para determinar la velocidad de combustión, combinadas con otras para la determinación de la radiación térmica emitida y el flujo térmico incidente sobre una superficie.

1.3.1. Hipótesis y limitaciones

Este modelo sólo ha sido validado para el caso de incendios en estado estacionario sobre tierra. No se considera el incendio sobre agua. Se supone también que la llama es de forma cilíndrica. No obstante, puede ser aplicado también a llamas de base rectangular si la relación entre el lado mayor y el menor es menor de dos.

El modelo no tiene en cuenta la influencia del viento sobre la forma y dimensiones de la llama, aunque sí tiene en cuenta la influencia sobre el poder emisor de la llama de la posible formación de hollín.

1.3.2. Datos necesarios

- ◇ Datos de la sustancia
 - ◆ Temperatura de ebullición
 - ◆ Entalpía de combustión
 - ◆ Entalpía de vaporización
 - ◆ Calor específico a presión constante
 - ◆ Densidad del líquido
 - ◆ Temperatura de la sustancia
- ◇ Datos meteorológicos
 - ◆ Temperatura ambiente
 - ◆ Densidad del aire
 - ◆ Humedad relativa
 - ◆ Presión de saturación del vapor de agua

1.3.3. Descripción

En primer lugar, se determina el flujo másico de evaporación en la superficie del charco distinguiendo entre:

- ◇ Líquidos muy volátiles (punto de ebullición inferior a la temperatura ambiente).
- ◇ Líquidos con punto de ebullición superior a la temperatura ambiente.

Conocido el diámetro de la llama (que se corresponderá con el diámetro del charco), puede determinarse la esbeltez de la llama.

Tras esto, se calculan los factores de visión horizontal y vertical de un elemento de superficie, así como la transmitancia atmosférica.

Finalmente, se calculará el flujo radiante global que alcanza a una superficie expuesta y la duración del incendio.

1.4. Dardo de fuego

En los recipientes de gas a presión, la aparición de una pequeña fisura en las paredes trae como consecuencia la descarga del gas contenido, formando un chorro de gas a presión. Si se trata de un gas inflamable y durante la descarga, este chorro entra en contacto con una

fuelle de ignición, el resultado será la formación de un incendio en forma de chorro o, como normalmente se denomina, dardo de fuego (*jet fire*, en inglés).

Los efectos de este tipo de accidentes son, fundamentalmente, los causados en el entorno por el calor generado e irradiado desde el dardo.

Para modelizar el dardo de fuego, se ha utilizado el modelo de Chamberlain (1987) propuesto por el "Yellow Book" del TNO. Este modelo calcula tanto la forma del dardo, representado como un cono truncado, como la radiación superficial emitida por dicho cono, considerado como cuerpo sólido.

1.4.1. Hipótesis y limitaciones

Este modelo considera que la transmisividad atmosférica es debida únicamente al vapor de agua presente, despreciándose el efecto del dióxido de carbono y otros gases. Además, no tiene en cuenta la formación de hollín en la combustión de los gases ni, por tanto su influencia sobre el poder emisor superficial del dardo.

El modelo no es capaz de calcular con certeza lo que ocurre en la sombra de la llama, ya que ésta está elevada del suelo.

Por último, las distancias calculadas representan la hipótesis hacia la que está orientado el dardo. Estas distancias se dan como radios desde el lugar de la fuga, quedando incluidos dentro de las distintas zonas de peligro lugares no afectados por la radiación prevista por el modelo.

1.4.2. Datos necesarios

- ◇ Datos de la sustancia.
 - ◆ Temperatura de ebullición
 - ◆ Peso molecular
 - ◆ Temperatura de la llama
 - ◆ Densidad del gas en condiciones normales
 - ◆ Relación entre calores específicos
 - ◆ Coeficiente estequiométrico de combustión
 - ◆ Entalpía de combustión
- ◇ Datos meteorológicos y del terreno
 - ◆ Temperatura ambiente
 - ◆ Velocidad del viento
 - ◆ Humedad relativa

- ◆ Presión de saturación del vapor de agua

1.4.3. Descripción

El modelo calcula las dimensiones físicas del dardo de fuego y la radiación térmica que sufriría un receptor a una distancia determinada. Dicho de otro modo, la distancia a la cual un objeto está expuesto a una determinada radiación térmica.

La secuencia de cálculo es la siguiente:

- ◆ Cálculo del diámetro efectivo de la fuente, previa determinación de la velocidad de salida del dardo.
- ◆ Cálculo de la forma del dardo (longitud del dardo con y sin viento, inclinación respecto al eje del agujero debido al viento, zona de no-ignición, diámetros de las bases del cono, área del cilindro equivalente).
- ◆ Cálculo del calor generado por combustión.
- ◆ Cálculo del poder emisor superficial.
- ◆ Cálculo del flujo de calor recibido a una distancia determinada.

1.5. BLEVE

El término BLEVE se utiliza para designar mediante su acrónimo en inglés una explosión física en la que interviene un líquido en ebullición que se incorpora rápidamente al vapor en expansión (“boiling liquid expanding vapour explosion”).

Un BLEVE produce diversos efectos, como son:

- ◆ Radiación térmica por la bola de fuego.
- ◆ Sobrepresión por la onda expansiva.
- ◆ Proyección de fragmentos metálicos o proyectiles del recipiente y piezas adyacentes.

De dichos efectos, el que generalmente tiene un alcance mayor es el de la radiación. Los factores que influyen fundamentalmente en dicho efecto son el tipo y cantidad de producto y las condiciones ambientales, fundamentalmente, temperatura y humedad relativa.

1.5.1. Bolas de fuego

El modelo matemático para la predicción de la distribución de radiación térmica se basa en la utilización de ecuaciones semiempíricas clásicas para determinar el diámetro, duración de la bola de fuego y la potencia emisiva, combinadas con otras para la determinación de la radiación térmica emitida y el flujo térmico incidente.

Hipótesis y limitaciones

Este modelo es aplicable únicamente a bolas de fuego que se producen al aire libre. Asimismo, sólo se ha validado para productos combustibles volátiles.

El método está basado en correlaciones empíricas sujetas a eventual revisión. Sin embargo, se considera adecuado para un análisis de consecuencias.

Datos necesarios

- ◇ Datos de la sustancia.
 - ◆ Entalpía de combustión
- ◇ Datos meteorológicos
 - ◆ Humedad relativa
 - ◆ Presión de saturación del vapor de agua
- ◇ Datos del recipiente
 - ◆ Masa total contenida en el recipiente
 - ◆ Volumen del recipiente

Descripción

El modelo permite obtener el flujo de radiación térmica sobre una superficie cercana a la bola de fuego. Para la aplicación de este modelo se toma como masa de combustible la masa total contenida en el recipiente accidentado. Los parámetros que se calculan son los siguientes:

- ◇ Cálculo del diámetro de la bola de fuego.
- ◇ Cálculo del poder emisivo de la bola de fuego.
- ◇ Cálculo de la transmitancia atmosférica.

Finalmente, se calculará el flujo radiante global que alcanza a una superficie expuesta, considerando el factor de visión entre la bola de fuego y el elemento de superficie considerado. Se calculará entonces la duración de la bola de fuego.

1.5.2. Estallido de recipientes

El estudio de la distribución espacial de sobrepresiones debidas al estallido de recipientes se realiza por aplicación del "Método de Brode".

Hipótesis y limitaciones

El método es únicamente aplicable a recipientes esféricos; no obstante, puede obtenerse una aproximación suficiente en recipientes de geometrías diferentes determinando un recipiente esférico equivalente.

En rigor, el método es válido únicamente para sobrepresiones superiores a 0,1 bar (10 kPa), pero puede extrapolarse hasta 0,05 bar (5 kPa) con un error por defecto inferior al 20%.

Datos necesarios

- ◇ Datos de la sustancia
 - ◆ Relación entre calores específicos
- ◇ Datos del recipiente
 - ◆ Volumen del recipiente
 - ◆ Presión en el interior del recipiente en el momento de la explosión
- ◇ Otros
 - ◆ Fracción de energía para ondas de presión

Descripción

El modelo permite obtener la sobrepresión producida por la onda de presión a distancias dadas del recipiente involucrado.

El método parte de la energía total liberada en el estallido que depende de la presión de los gases en el interior del recipiente en el momento de la explosión y del coeficiente de capacidades caloríficas (C_p/C_v).

La presión de los gases en el interior del recipiente en el momento de la explosión se puede estimar a partir de las condiciones de diseño del recipiente. Se suele tomar como valor de cálculo 1,25 veces la presión de diseño del recipiente.

Conocida la energía total liberada en el estallido, se determinan, en función del tipo de rotura del recipiente, las energías disponibles para ondas de presión y para proyectiles. El reparto se realiza en función del tipo de rotura (dúctil o maleable) y de la fracción de la energía total utilizada en la proyección de fragmentos y de sobrepresión.

De esta forma, denotando f como la fracción (tanto por uno) de la energía total que se disipa en forma de ondas de sobrepresión, las energías disponibles para ondas de presión y para proyectiles (E_p y E_m , respectivamente) vendrán determinadas por:

$$E_p = \text{Energía total} \times f$$

$$E_m = \text{Energía total} \times (1-f).$$

Conocida E_p se determina la "escala de longitudes" (D).

En el cálculo de sobrepresiones, dependiendo de si la distancia al punto del accidente supera o no la relación $r/D = 0,26$ (con r = distancia al punto del accidente), se utilizará una expresión u otra.

1.6. Dispersión de una nube

Cuando se produce una emisión de un gas o vapor a la atmósfera, ya sea procedente de una fuga de gas propiamente dicha o como consecuencia de la evaporación de un charco de líquido, dicho gas sufre una dispersión por su dilución en la atmósfera y se extiende en ella arrastrado por el viento y las condiciones meteorológicas.

El estudio de la distribución espacio-temporal de las concentraciones $[C(x,y,z,t)]$ se realiza por aplicación del modelo de Pasquill-Gifford, que está contenido dentro de los denominados "Modelos Gaussianos".

1.6.1. Hipótesis y limitaciones

Se supone que la densidad del gas que se dispersa es igual a la del aire.

No se tienen en cuenta las posibles acumulaciones "*buffers*" de sustancia que pueden producirse en las proximidades de la fuente antes de la dispersión.

El método no es aplicable para velocidades del viento inferiores a 0,5 m/s, pues a estas velocidades la dirección de éste resulta tan incierta que enmascara el efecto de la turbulencia.

Las clases de estabilidad atmosférica definidas no son aplicables para dispersiones sobre el mar.

El modelo no tiene en cuenta los posibles mecanismos de eliminación de sustancia de la nube como son:

- ◇ Deposición seca, por reacción con la superficie del terreno o la vegetación que lo cubre.
- ◇ Deposición húmeda, por arrastre y disolución por la lluvia en su caída.

- ◊ Precipitación gravitatoria, en el caso de aerosoles de partículas sólidas o gotas suficientemente pesadas.
- ◊ Reacción o alteración química en la atmósfera.

Por último, debe tenerse presente que la concentración determinada por el modelo es la promedio en el tiempo para las variables con oscilaciones turbulentas. Evidentemente, se producen localmente (en tiempo y espacio) fluctuaciones respecto del valor calculado, que pueden ser muy importantes.

1.6.2. Datos necesarios

Los datos que se necesitan para la realización del modelo son los siguientes:

- ◆ Velocidad del viento y categoría de estabilidad atmosférica.
- ◆ Posición en la que se quiere determinar la concentración.
- ◆ Altura del punto de emisión.
- ◆ Características de rugosidad de la zona donde se dispersa la nube.

1.6.3. Descripción

La concentración del tóxico en cualquier punto e instante de tiempo $C(x,y,z,t)$ se determinará por la ecuación:

$$C(x, y, z, t) = \frac{m}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z^*} \cdot \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{2 \cdot \sigma_x^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2 \cdot \sigma_z^{*2}}\right] + \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2 \cdot \sigma_z^{*2}}\right] \right\}$$

Siendo: m = masa de sustancia contaminante emitida,
 u = velocidad del viento,
 h = altura del punto de emisión,
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z^*$ = coeficientes de difusión en los tres ejes del espacio. Se calculan a partir de las curvas de Pasquill-Gifford, según el tipo de estabilidad atmosférica existente.

El sistema de coordenadas se ha fijado de la siguiente forma:

- ◊ El origen está situado en la base del punto de emisión.
- ◊ El eje OX es paralelo a la dirección media del viento.

- ◇ El eje OY es horizontal y perpendicular a la dirección media del viento.
- ◇ El eje OZ es vertical y hacia arriba.

Los coeficientes σ_x y σ_y son las dispersividades en las direcciones x e y respectivamente, mientras que σ_z^* es la dispersividad vertical corregida por la rugosidad del terreno. Dichas dispersividades se determinan mediante las expresiones:

$$\sigma_x = 0,13 \cdot x$$

$$\sigma_y = a \cdot x^b$$

$$\sigma_z = c \cdot x^d$$

Los parámetros a , b , c y d dependen de las categorías de estabilidad. Las dispersividades así determinadas son válidas para distancias del emisario comprendidas entre 100 y 10.000 metros.

La dispersividad vertical corregida σ_z^* es la que tiene en cuenta la topografía del terreno al que se aplica el modelo gaussiano y se relaciona con la σ_z mediante las expresiones:

$$\sigma_z^* = \sigma_z \cdot (10 \cdot z_0)^m$$

$$m = 0,53 \cdot x^{-0,22}$$

La aplicación del modelo será función de la distancia en la dirección del viento (coordenada x) del punto en el que se desee determinar la concentración, de la velocidad del viento (u), del tiempo de duración de la emisión (t), así como, de las cotas de los puntos en los que se determina la concentración.

El resultado del modelo permite obtener las distancias a las que se dan concentraciones peligrosas, así como obtener isopleas (líneas que unen puntos de la misma concentración).

1.7. Explosión química

Una explosión libera energía de manera súbita y violenta. Las explosiones químicas liberan energía química. Esta energía procede de una reacción química exotérmica (combustión, polimerización, descomposición química...).

En este caso, la explosión puede ocurrir aunque la materia no esté confinada. Si la explosión química ocurre sobre una sustancia confinada en el interior de un depósito, la energía liberada en la reacción produce un brusco incremento de presión de la mezcla reactivos-productos hasta superar la capacidad resistente del continente. El desencadenante puede ser un incremento de temperatura, la presencia de impurezas que actúen como catalizadores...

El estudio de la distribución espacial de sobrepresiones debidas al estallido de depósitos se realiza por aplicación del "Método de Brode".

1.7.1. Hipótesis y limitaciones

El método es únicamente aplicable a depósitos esféricos, no obstante, puede obtenerse una aproximación suficiente en depósitos de geometrías diferentes determinando un depósito esférico equivalente.

En rigor, el método es válido únicamente para sobrepresiones superiores a 0,1 bar (10 kPa), pero puede extrapolarse hasta 0,05 bar (5 kPa) con un error por defecto inferior al 20%.

1.7.2. Datos necesarios

- ◇ Datos de la sustancia
 - ◆ Peso molecular
 - ◆ Relación entre calores específicos
 - ◆ Entalpía de descomposición
- ◇ Datos del recipiente
 - ◆ Masa efectiva que reacciona
 - ◆ Volumen del recipiente
 - ◆ Presión de almacenamiento o de transporte
- ◇ Otros
 - ◆ Fracción de energía para ondas de presión

1.7.3. Descripción

El método parte de la energía total liberada en el estallido, que se puede calcular a partir del calor de reacción y la masa equivalente de sustancia que reacciona. Esta masa no coincidirá con la contenida inicialmente en el tanque, por lo que para su determinación habrá que tener en cuenta:

- ◆ Dilución o tanto por ciento de pureza del contenido.
- ◆ Porcentaje de sustancia que reacciona.
- ◆ Energía consumida para la elevación de temperatura hasta el punto de ebullición y la posterior vaporización de la mezcla reactivos-productos.
- ◆ Energía inicial de expansión disponible (para almacenamientos en tanques a presión).

Conocida la energía total liberada en el estallido, se determinan las energías disponibles para ondas de presión y para proyectiles en función del tipo de rotura del tanque. El reparto se realiza en función del tipo de rotura (dúctil o maleable) y de la fracción de la energía total utilizada en la proyección de fragmentos y de sobrepresión.

De esta forma, denotando f como la fracción (tanto por uno) de la energía total que se disipa en forma de ondas de sobrepresión, las energías disponibles para ondas de presión y para proyectiles (E_p y E_m , respectivamente) vendrán determinadas por:

$$E_p = \text{Energía total} \times f$$

$$E_m = \text{Energía total} \times (1-f).$$

Conocida E_p se determina la "escala de longitudes" (D).

En el cálculo de sobrepresiones, dependiendo de si la distancia al punto del accidente supera o no la relación $r/D = 0,26$ (con r = distancia al punto del accidente), se utilizará una expresión u otra.

1.8. Metodología Probit

El análisis de consecuencias derivadas de los fenómenos peligrosos asociados a los accidentes graves se realiza por aplicación de la "metodología Probit".

El método consiste en la aplicación de correlaciones estadísticas para estimar las consecuencias desfavorables sobre la población u otros elementos vulnerables (instalaciones) de los fenómenos físicos peligrosos consecuencia de los accidentes.

La vulnerabilidad de personas se expresa como el número de individuos que, previsiblemente, pueden resultar afectados con un cierto nivel de daño a causa de un accidente. Por otra parte, la vulnerabilidad de instalaciones se puede cuantificar utilizando magnitudes económicas, aunque se va a reducir el análisis a las estimaciones de daños en estructuras y roturas de cristales.

1.8.1. Hipótesis y limitaciones

La respuesta de una población ante un fenómeno físico peligroso se distribuye según una ley log-normal.

El modelo es aplicable únicamente para aquellos fenómenos de los que se dispone de "ecuación probit". En este caso, se aplica a efectos de radiación térmica, debidos bien a incendios de charco, bien a dardos de fuego o bien a bolas de fuego, y efectos de sobrepresión, debidos a explosiones.

1.8.2. Descripción

El método permite determinar la proporción de población u otros elementos vulnerables que resultará afectada a consecuencia del accidente en un punto dado. Consiste en asociar la probabilidad de un daño con unas determinadas unidades Probit.

En el método se calcula la variable probit V que depende de una serie de parámetros (constantes K_1 y K_2 y variable física representativa del accidente, V). Éstos tendrán un valor u otro según la naturaleza de la consecuencia que se está estudiando. Estas consecuencias son:

- ◊ Consecuencias de incendios de charco, dardos y bolas de fuego: analiza las zonas del espacio dadas por la probabilidad de ocurrencia de muertes debidas a radiación térmica, dando la probabilidad de muerte del 99%, 50% y 1%.

V	K₁	K₂
$V = t \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{q}{A}\right)^4}$	-36,38	2,56

q/A = flujo de radiación térmica (W/m^2)
 t = tiempo de exposición (s)

- ◊ Consecuencias de explosiones (BLEVE y UVCE): analiza las zonas del espacio dadas por la probabilidad de ocurrencia (del 99%, 50% y 1%) de los siguientes efectos, consecuencias de la sobrepresión:
 - ◆ Probabilidad de muertes por hemorragia pulmonar.
 - ◆ Probabilidad de rotura de tímpanos.
 - ◆ Daños en estructuras.
 - ◆ Probabilidad de rotura de cristales.

TIPO DE DAÑO	V	K ₁	K ₂
Muertes por hemorragia pulmonar	p	-77,1	6,91
Rotura de tímpanos	p	-15,6	1,93
Daños en estructuras	p	-23,8	2,92
Rotura de cristales	p	-18,1	2,79

p = sobrepresión (Pa)

- ◇ Consecuencias de nubes tóxicas: analiza las zonas del espacio dadas por la probabilidad de ocurrencia de muertes debidas a la inhalación de la sustancia tóxica estudiada, dando la probabilidad de muerte del 99%, 50% y 1%. Para ello, la intensidad del factor causante (V) ha de tener en cuenta tanto la concentración como el tiempo de exposición.

$$V = \int_0^t \exp C^n \cdot dt$$

Siendo C la concentración en partes por millón (ppm) y n una constante que depende de la sustancia tóxica que se está analizando. Lo mismo que las constantes K_1 y K_2 , que dependen de cada sustancia.

En función de la variable probit, la “probabilidad del daño” se determina a partir de una función de error evaluada en el punto correspondiente.

2. Definición de las zonas objeto de planificación

De acuerdo con lo especificado en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el riesgo de accidentes en los transportes de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril (Real Decreto 387/1996), para estimar el riesgo en las zonas de especial relevancia, también denominadas zonas de especial exposición, se utilizarán los valores umbrales relativos a las magnitudes de los fenómenos peligrosos capaces de producirse. A estos efectos podrán utilizarse los valores umbral establecidos en la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, publicada en el Real Decreto 1196/2003.

A continuación se recogen dichos valores umbral así como una descripción de los conceptos de daño, riesgo y vulnerabilidad según el mencionado Real Decreto.

2.1. Naturaleza del riesgo

Se entiende naturaleza del riesgo como la probabilidad de que se produzca un daño determinado de origen físico-químico, por causa de sucesos imprevistos en el desarrollo de las actividades industriales.

Para la determinación de los riesgos así entendidos, se procederá a efectuar una identificación de los riesgos, seguida de una evaluación de los mismos.

2.2. Naturaleza del daño

El control y la planificación ante el riesgo de un accidente grave se han de fundamentar en la evaluación de las consecuencias de los fenómenos peligrosos que pueden producir los accidentes graves susceptibles de ocurrir en la actividad en cuestión, sobre los elementos vulnerables, en el ámbito territorial del plan.

Los diversos tipos de accidentes graves a considerar, pueden producir los siguientes fenómenos peligrosos para personas, el medio ambiente y los bienes:

- ◇ De tipo mecánico: Ondas de presión y proyectiles.
- ◇ De tipo térmico: Radiación térmica.
- ◇ De tipo químico: Nube tóxica o contaminación del medio ambiente provocada por la fuga o vertido incontrolado de sustancias peligrosas.

Estos fenómenos pueden ocurrir aislada, simultánea o secuencialmente.

2.2.1. Fenómenos mecánicos peligrosos

Se incluyen aquí las ondas de presión y los proyectiles. Las ondas de presión son provocadas por las explosiones o equilibrio rápido entre una masa de gases a presión elevada y la atmósfera que la envuelve. En el caso de que la energía necesaria para la expansión del gas proceda de un fenómeno físico, se dice que la explosión es física y se requiere que el producto esté confinado en un recipiente estanco (denominándose estallido). Por contra, si la energía procede de una reacción química, se trata de una explosión química (o explosión, simplemente). En este caso la explosión puede ocurrir aunque el producto no esté confinado.

Una explosión confinada, o estallido, puede originar fragmentos del continente y una no confinada, de sólidos de las inmediaciones del punto en que se ha producido la explosión. Estos fragmentos o proyectiles están dotados de gran cantidad de movimiento y sus dimensiones y alcance son variados pero limitados.

Los efectos de la onda de presión pueden clasificarse como sigue:

- ◇ Efectos primarios: Los efectos primarios de la onda de presión tienen su origen en las compresiones y expansiones del aire atmosférico que pueden producir fenómenos de deformación y vibratorios que afecten a las estructuras de edificios e instalaciones y a los organismos vivos.
- ◇ Efectos secundarios: Los efectos secundarios de la onda de presión tienen lugar cuando las deformaciones y tensiones dinámicas producidas superan las características de resistencia de las estructuras y éstas fallan. El fallo o rotura de las estructuras origina la formación de fragmentos que, por el impulso recibido de la onda de presión, actúan a su vez como proyectiles, cuyo impacto causa daños mecánicos adicionales.
- ◇ Efectos terciarios: Los efectos terciarios de la onda de presión consisten en los daños causados por el desplazamiento del cuerpo de seres vivos e impacto del mismo contra el suelo u otros obstáculos.

Al ser la onda de presión y los proyectiles fenómenos propagativos, la protección mediante obstáculos de rigidez adecuada (muros resistentes, fortines) es efectiva. Sin embargo, pueden producirse daños ocasionados por ondas reflejadas, cuya supresión ofrece una mayor dificultad. Tanto la sobrepresión máxima como el impulso, disminuyen con la distancia al origen.

2.2.2. Fenómenos térmicos peligrosos

Son provocados por la oxidación rápida, no explosiva, de sustancias combustibles, produciendo llama, que puede ser estacionaria (incendio de charco, dardo de fuego) o progresiva (llamarada, bola de fuego), pero que en todos los casos disipa la energía de combustión mayoritariamente por radiación que puede afectar a seres vivos e instalaciones materiales.

Si la materia sobre la que incide el flujo de radiación térmica, no puede disiparlo a la misma velocidad que lo recibe, éste provoca un incremento de la temperatura de la misma. Si este incremento no se limita, se producen alteraciones irreversibles y catastróficas, que pueden culminar en la combustión o fusión y volatilización de la materia expuesta.

En las proximidades del punto donde se desarrolla la llama, se tiene transmisión del calor tanto por convección como por radiación y conducción. Así pues, la única forma de evitar o mitigar sus efectos, es la utilización de vestuarios o protecciones adecuados. En contraposición, a partir de una cierta distancia del foco del incendio, la transmisión del calor se efectúa exclusivamente por radiación, disminuyendo su intensidad al aumentar dicha distancia. Esto hace que cualquier pantalla opaca a la radiación térmica pueda constituir una medida de protección sumamente eficaz.

2.2.3. Fenómenos químicos peligrosos

Se incluyen aquí las nubes tóxicas o la contaminación del medio ambiente debida a fugas o vertidos incontrolados de sustancias peligrosas para las personas y el medio ambiente.

Estas sustancias químicas directa o indirectamente, a través de reacciones secundarias inmediatas o diferidas, pueden producir efectos muy diversos en función de la categoría de la sustancia peligrosa de que se trate.

Los daños dependerán, para cada entorno, de las características orográficas del terreno, la concentración del tóxico y el tiempo de exposición.

La característica esencial de todos los productos y sustancias tóxicas, es que para producir consecuencias deben difundirse a través de un medio, lo que requiere que transcurra un tiempo y, en ocasiones, permite la aplicación de medidas de protección más fácilmente que para los fenómenos térmicos y mecánicos. Sin embargo, en muchos casos, resulta muy difícil conocer el desplazamiento de los contaminantes, su evolución, así como eliminarlos totalmente del medio al que se han incorporado.

La liberación incontrolada de productos contaminantes, conlleva riesgos asociados cuyas consecuencias son diferidas en la mayoría de las ocasiones. Es por ello que a la hora de delimitar las zonas afectadas por estos sucesos, es preciso el conocimiento de las circunstancias, en su más amplio sentido, bajo las que se desarrolla el accidente, así como la naturaleza del producto fugado en lo que a su capacidad contaminante se refiere.

Por lo que respecta a las sustancias peligrosas para el medio ambiente, se pueden producir alteraciones del mismo por distintos sucesos, que son consecuencia de un desarrollo incontrolado de una actividad industrial. Entre tales sucesos se pueden incluir:

- ◇ Vertido de productos contaminantes en aguas superficiales, pudiéndose derivar de ello la contaminación de aguas potables o graves perjuicios para el medio ambiente y las personas.
- ◇ Filtración de productos contaminantes en el terreno y aguas subterráneas dejándolos inservibles para su explotación agrícola, ganadera y de consumo.
- ◇ Emisión de contaminantes a la atmósfera que determinan la calidad del aire provocando graves perturbaciones en los ecosistemas receptores con posible posterior incorporación a la cadena trófica.

2.3. Análisis de vulnerabilidad de personas y bienes

2.3.1. Variables peligrosas para las personas y bienes

Para cada uno de los fenómenos peligrosos relacionados en el apartado anterior, se establecen unas variables físicas cuyas magnitudes puedan considerarse suficientemente representativas para la evaluación del alcance del fenómeno peligroso considerado. Las zonas potencialmente afectadas por los fenómenos peligrosos que se derivan de los accidentes se hallan en base a las distancias a las que determinadas variables físico-químicas representativas de los fenómenos peligrosos alcanzan unos ciertos valores umbral que se indican a continuación.

Variables para los fenómenos mecánicos

- ◇ Valor local integrado del impulso, en explosiones y deflagraciones.
- ◇ Sobrepresión local estática de la onda de presión, también en explosiones y deflagraciones.
- ◇ Alcance máximo de los proyectiles con impulso superior a 10 mbar·s, producidos en la explosión o estallido de determinadas instalaciones industriales u originados en otras contiguas, a consecuencia de dichos fenómenos, o por desprendimiento de fragmentos a causa de una onda de presión.

Variables para los fenómenos de tipo térmico

Dosis de radiación, D, recibida por los seres humanos procedentes de las llamas o cuerpos incandescentes en incendios y explosiones, expresada mediante:

$$D = I_m^{4/3} \cdot t_{exp}$$

donde: I_m = intensidad media recibida [kW/m^2],
 t_{exp} = tiempo de exposición [s].

Esta expresión es válida para intensidades superiores a $1,7 \text{ kW/m}^2$. Para valores inferiores al anterior, el tiempo de exposición es prácticamente irrelevante, esto es, se considera que en dichas condiciones, la mayoría de la población puede estar expuesta durante dilatados periodos de tiempo sin sufrir daño.

Con fines de planificación, en los incendios de corta duración, inferiores a 1 minuto, el tiempo de exposición se hace coincidir con la duración de éstos; para los de mayor duración, se establece como tiempo de exposición el transcurrido hasta que los afectados alcancen una zona protegida frente a la radiación o donde la intensidad térmica sea inferior a $1,7 \text{ kW/m}^2$.

Para este último caso, y con objeto de determinar las distancias que delimitan las zonas de intervención y alerta, se recomienda seguir el modelo de respuesta de la población ante la génesis de incendios, propuesto por TNO. En él se establece un primer periodo de reacción de unos 5 segundos, donde la población permanece estática y a continuación se produce la huida, alejándose del incendio a una velocidad media de 4 m/s .

Variables para los fenómenos de tipo químico

Para este tipo de fenómenos la variable representativa del daño inmediato originado por la liberación de productos tóxicos es la concentración de tóxico o la dosis, D, definida mediante:

$$D = C_{m\acute{a}x}^n \cdot t_{exp}$$

donde: $C_{m\acute{a}x}$ = concentración máxima de la sustancia en el aire,
 t_{exp} = tiempo de exposición,
n = exponente que depende de la sustancia química.

Se utilizan los siguientes índices: AEGL (Acute Exposure Guideline Levels), propuestos inicialmente por la Environmental Protection Agency, definidos para tres niveles de daño (1, 2 y 3), considerando para cada nivel los periodos de referencia siguientes: 30 minutos, 1, 4 y 8 horas y, en algunos casos, establecidos también para un periodo de 10 minutos.

Si la sustancia no tiene definido el índice anterior se utilizarán los denominados ERPGs (Emergency Response Planning Guidelines) publicados por la American Industrial Hygiene Association y/o los TEELs (Temporary Emergency Exposure Limits) desarrollados por el Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Estos dos últimos índices están definidos para los mismos niveles de daño que los establecidos para los AEGLs pero, en cada caso, para un único periodo de referencia: 1 hora para los ERPGs y 15 minutos para los TEELs.

Consideraciones para la utilización de los índices

Todos los índices representan concentraciones máximas que no deben ser sobrepasadas en ningún momento durante su respectivo tiempo de referencia, por lo que pueden considerarse como “valores techo”.

Los índices AEGLs se pueden interpolar para tiempos de paso de nubes (t_p) distintos a los de referencia. Para ello, se determina previamente la dosis, D , y el exponente, n , de la ecuación anterior, utilizando los índices cuyos tiempos de referencia comprenden al tiempo de paso mencionado; con dichos datos se calcula la nueva concentración máxima, $C_{m\acute{a}x}$, mediante:

$$C_{m\acute{a}x} = \left(\frac{D}{t_p} \right)^{1/n}$$

Los índices AEGLs no deben extrapolarse para tiempos de paso de nubes inferiores al menor periodo de referencia disponible; por consiguiente, la concentración máxima correspondería al AEGL definido para el menor periodo de referencia. Por el contrario, se pueden realizar extrapolaciones para tiempos de paso superiores al mayor tiempo de referencia disponible, aunque esta situación es muy poco probable dado que normalmente los AEGLs están definidos para periodos de hasta 8 horas.

Cuando se utilicen los índices ERPGs, las concentraciones máximas se establecen de la forma siguiente:

- ◊ Los valores ERPG que correspondan (nivel 1 ó 2), si el tiempo de paso es igual o inferior a 60 minutos;
- ◊ Para tiempos de paso superiores a 60 minutos, extrapolar los índices mediante la ley de Haber:

$$C_{m\acute{a}x} = \text{ERPG} \cdot \left(\frac{60}{t_p} \right)$$

Si sólo se dispone del índice TEEL, se verifica:

- ◊ Si el tiempo de paso de la nube es inferior a 15 minutos, utilizar directamente las concentraciones correspondientes a los respectivos TEEL.
- ◊ Para tiempos de paso superiores a 15 minutos, extrapolar los índices mediante la Ley de Haber:

$$C_{\text{máx}} = \text{TEEL} \cdot \left(\frac{15}{t_p} \right)$$

En todas las ecuaciones anteriores el tiempo de paso está expresado en minutos.

2.3.2. Análisis de consecuencias

Se entiende por análisis de consecuencias el cálculo, espacial y temporal, de las variables físicas representativas de los fenómenos peligrosos descritos anteriormente y sus posibles efectos sobre las personas, el medio ambiente y los bienes, con el fin de estimar la naturaleza y magnitud del daño.

Las metodologías adoptadas para evaluar las consecuencias a efectos de planificación, se han descrito en el apartado anterior y son de probada eficacia científica y reconocimiento internacional.

2.3.3. Definición de las zonas objeto de planificación: valores umbrales

En concreto, se definen las siguientes zonas:

- ♦ **Zona de intervención:** Es aquella en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección.
- ♦ **Zona de alerta:** Es aquella en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, aunque perceptibles por la población, no justifican la intervención, excepto para los grupos críticos de población.

Valores umbrales para la zona de intervención

Los valores umbrales que deberán adoptarse para la delimitación de la zona de intervención son los que a continuación se señalan:

- ♦ Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 150 mbar·s.
- ♦ Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 125 mbar.
- ♦ El alcance máximo de proyectiles con un impulso superior a 10 mbar·s en una cuantía del 95%, producidos por explosión o estallido de continentes.
- ♦ Una dosis de radiación térmica de 250 (kW/m²)^{4/3}·s, equivalente a las combinaciones de intensidad térmica y tiempo de exposición que se indican a continuación.

I, kW/m²	7	6	5	4	3
t_{exp}, s	20	25	30	40	60

- ◇ Concentraciones máximas de sustancias tóxicas en el aire calculadas a partir de los índices AEGL-2, ERPG-2 y/o TEEL-2, siguiendo los criterios expuestos en el apartado 2.3.1. del presente Anexo.

Valores umbrales para la zona de alerta

Para delimitación de la Zona de Alerta se considerarán los siguientes valores umbrales o circunstancias:

- ◇ Un valor local integrado del impulso, debido a la onda de presión, de 100 mbar·s.
- ◇ Una sobrepresión local estática de la onda de presión de 50 mbar.
- ◇ El alcance máximo de proyectiles con un impulso superior a 10 mbar·s en una cuantía del 99,9%, producidos por explosión o estallido de continentes.
- ◇ Una dosis de radiación térmica de 115 (kW/m²)^{4/3}·s, equivalente a las combinaciones de intensidad térmica y tiempo de exposición que se indican a continuación.

I, kW/m²	6	5	4	3	2
t_{exp}, s	11	15	20	30	45

- ◇ Concentraciones máximas de sustancias tóxicas en aire calculadas a partir de los índices AEGL-1, ERPG-1 y/o TEEL-1, siguiendo los criterios expuestos en el apartado 2.3.1. del presente Anexo.

Valores umbrales para el Efecto Dominó

Para la determinación de un posible efecto dominó de un accidente grave en instalaciones circundantes o próximas, se establecen los siguientes valores umbral:

- ◆ Radiación térmica: 8 kW/m².
- ◆ Sobrepresión: 160 mbar.
- ◆ Alcance máximo de los proyectiles producidos por explosión o estallido de continentes (la distancia se calcula en función de las hipótesis accidentales consideradas).

	Gobierno de La Rioja	
	Anexo L	
	ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS	

En cualquier caso, podrán utilizarse otros valores umbral, siempre y cuando se apoyen en referencias técnicas avaladas y se justifiquen debidamente las circunstancias establecidas para dichos valores, en relación a la naturaleza del material afectado, duración de la exposición, geometría del equipo, contenido, presencia de aislamiento y revestimiento, etc.

3. Análisis de consecuencias en el transporte de mercancías peligrosas por carretera en La Rioja

A continuación se presenta el desarrollo del análisis de consecuencias realizado para las distintas mercancías peligrosas transportadas por carreteras de La Rioja.

ONU 1010: Butadienos estabilizados o butadienos e hidrocarburos en mezcla estabilizada

El número ONU 1010 corresponde a butadienos estabilizados o mezcla estabilizada de butadienos e hidrocarburos, que contengan más del 40% de butadienos. Estos butadienos están clasificados según el ADR como gases dentro de la clase 2, con código de clasificación 2F, es decir, gases inflamables. Dentro de este número ONU el producto más comercializado y transportado es el 1,3-butadieno, razón por la que se ha llevado cabo el análisis de consecuencias para este isómero.

El alcance de las consecuencias de un accidente con 1,3-butadieno depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.1) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

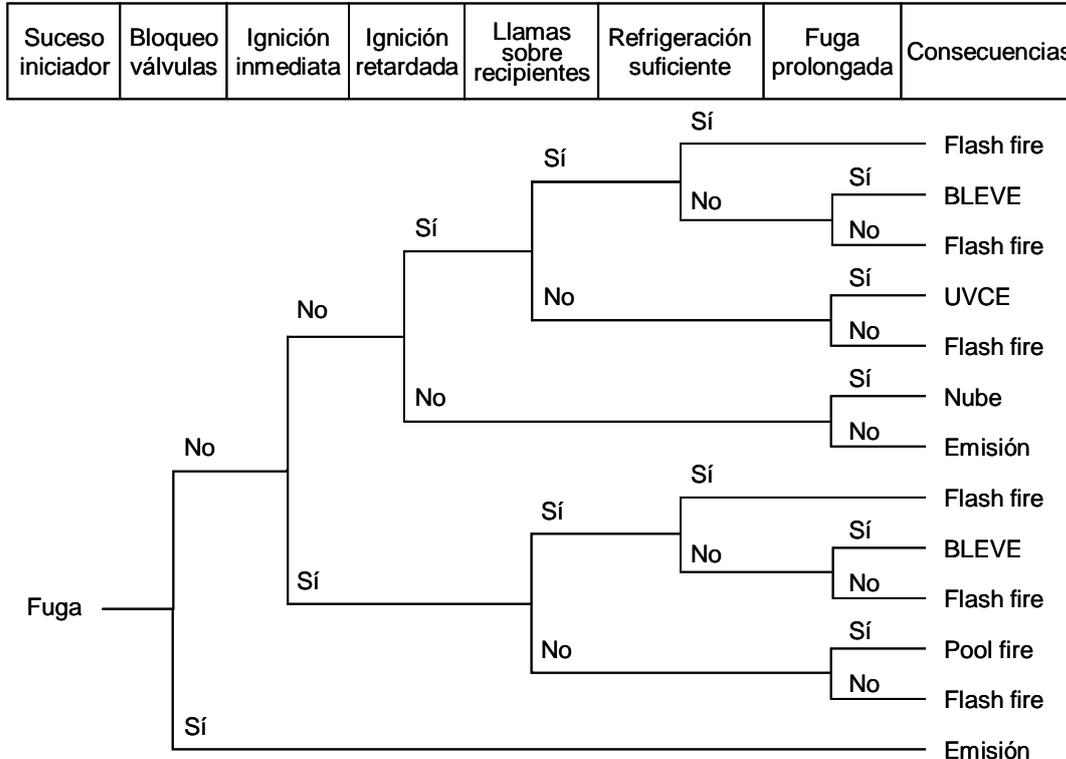


Figura L.1. Árbol de sucesos de una fuga de 1,3-butadieno.

Tomando como suceso iniciador la fuga de 1,3-butadieno líquido, es decir, el derrame, como la temperatura del fluido es muy inferior a la temperatura ambiente, una parte del líquido que escapa pasa a fase gaseosa instantáneamente, sufriendo lo que se denomina evaporación súbita o flash. El resto del líquido formaría un charco que en caso de que entrase en ignición, daría lugar a un incendio del charco o *pool fire*.

En caso negativo, y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido del charco, debido principalmente al aporte de calor del terreno. Esta cantidad de gas, junto con la evaporada súbitamente, formaría una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

En el supuesto de que la fuga se produzca en la parte del gas del recipiente, se produciría un dardo que en caso de incendiarse formaría un dardo de fuego (*jet fire*).

Por último, como consecuencia de un incendio cerca del recipiente, se podría producir un BLEVE del mismo.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de 1,3-butadieno de las siguientes características.

▶ Cantidad	23 Tm
▶ Longitud	14 m
▶ Temperatura	ambiente
▶ Presión	saturación

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de 1,3-butadieno que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de 1,3-butadieno líquido por una perforación de 2" de diámetro en la zona de líquido de un camión cisterna

▶ Diámetro del orificio	50,8 mm
▶ Duración de la fuga	30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 11,98 kg/s. Una parte del mismo sufrirá una evaporación súbita (1,18 kg/s) y el resto (11,98 kg/s) formará un charco de 73 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia del aporte de calor del terreno (11,052 kg/s).

- ◊ Fuga de 1,3-butadieno gas por una perforación de 2" de diámetro en la zona de gas de un camión cisterna

▶ Diámetro del orificio	50,8 mm
▶ Duración de la fuga	30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 0,615 kg/s.

- ◊ Fuga de 1,3-butadieno líquido por colapso total del camión cisterna

Tras el colapso del camión cisterna, parte del líquido fugado sufrirá una evaporación súbita (2.170 kg) y el resto formará un charco de 77 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia del aporte de calor del terreno (11,57 kg/s).

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a tierra llana, huerta con pocos árboles (0.03 m).

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce una fuga de butadieno, parte se evapora instantáneamente y el resto forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.1. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Dardo de fuego

Al tratarse el butadieno de un gas presurizado, en el supuesto de que la fuga se produzca en la parte del gas del vagón cisterna, se produciría un dardo que en caso de incendiarse formaría un dardo de fuego (*jet fire*).

Para el cálculo de la radiación emitida por un dardo de fuego es necesario conocer dos ángulos:

- ◊ el ángulo entre la dirección del viento y el vector normal al recipiente, en el plano horizontal, y
- ◊ el ángulo entre el eje del agujero y la horizontal.

Se han tomado los valores más desfavorables. El primero de ellos, ocurre cuando el viento sopla perpendicularmente al vagón, es decir, 0°. Y para el segundo, se ha tomado el valor de 31°, tras realizar un estudio en el que se buscaba el ángulo que daba mayores valores de las zonas de objeto de planificación.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), de la zona de alerta (Z.A.) y de la zona del efecto dominó (E.D.) para los estudios analizados se encuentran recogidos en la tabla L.1.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Como se ha comentado anteriormente, cuando hay una fuga de butadieno líquido, una parte sufre una evaporación súbita o *flash* y el resto forma un charco. En caso de no producirse la ignición, parte de este se evapora formando una nube que puede encontrar una fuente de

ignición y explosionar. El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los cálculos que se han realizado están basados en este caso más desfavorable. Los valores obtenidos (en metros) para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.1. Este valor C.E. es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

BLEVE

Se han calculado (tabla L.1) las zonas de intervención, de alerta y del efecto dominó para la radiación térmica y la sobrepresión, así como una estimación del alcance de los proyectiles considerando que el 4% de la energía se utiliza para este fin y el resto para la formación de ondas de presión.

Iniciador	Condiciones de fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 11,98 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 11,02 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 73 \text{ m}$	Rad. térmica	168	236	110
		UVCE C.E. = 215 m	Sobrepresión	296	740	232
Perf. 2" zona gas camión	$Q_{descarga} = 0,61 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	DARDO DE FUEGO	Rad. térmica	--	2,44	--
Colapso camión	Masa = 23.000 kg $Q_{evap} = 11,57 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 77 \text{ m}$	Rad. térmica	177	249	116
		UVCE C.E. = 218 m	Sobrepresión	301	751	235
		BLEVE	Rad. térmica Sobrepresión Proyectiles	362 32 --	514 58 --	472 27 --

Tabla L.1. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de 1,3-butadieno líquido.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En las siguientes tablas se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	40 m	43 m
Radio zona de probabilidad del 50%	61 m	65 m
Radio zona de probabilidad del 1%	97 m	103 m

Tabla L.2. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de 1,3-butadieno líquido estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. LIQ. CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	18 m	19 m
Radio zona de probabilidad del 50%	26 m	26 m
Radio zona de probabilidad del 1%	37m	37m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	26 m	26 m
Radio zona de probabilidad del 50%	86 m	87 m
Radio zona de probabilidad del 1%	287 m	291 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	47 m	47m
Radio zona de daños irreversibles	93 m	94m
Radio zona de daños graves reparables	247 m	251m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	407 m	413 m
Radio zona de probabilidad del 50%	938 m	953 m
Radio zona de probabilidad del 1%	2.161 m	2.195 m

Tabla L.3. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de 1,3-butadieno líquido.

En el caso de BLEVE, se obtienen consecuencias de la radiación y consecuencias de la sobrepresión.

		CAMIÓN
Efectos de la radiación térmica		
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%		252 m
Radio zona de probabilidad del 50%		307 m
Radio zona de probabilidad del 1%		392 m
Efectos de la sobrepresión		
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%		7 m
Radio zona de probabilidad del 50%		8 m
Radio zona de probabilidad del 1%		10 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%		8 m
Radio zona de probabilidad del 50%		15 m
Radio zona de probabilidad del 1%		31 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición		11 m
Radio zona de daños irreversibles		15 m
Radio zona de daños graves reparables		28 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%		39 m
Radio zona de probabilidad del 50%		67 m
Radio zona de probabilidad del 1%		104 m

Tabla L.4. Análisis de vulnerabilidad de BLEVEs de 1,3-butadieno líquido.

ONU 1017: Cloro

El cloro, con número ONU 1017, está clasificado en el ADR, como un gas licuado de la clase 2, con código de clasificación 2TOC, es decir, gas licuado tóxico, comburente y corrosivo.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de cloro. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.2) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso Iniciador	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	-----------------	---------------

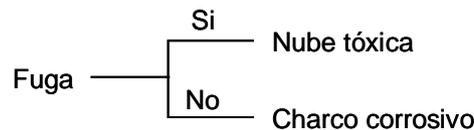


Figura L.2. Árbol de sucesos de una fuga de cloro líquido.

Tomando como suceso iniciador el derrame de cloro líquido, como la temperatura del fluido es superior a su punto de ebullición, una parte del líquido escapa pasa a fase gaseosa instantáneamente, sufriendo lo que se denomina evaporación súbita o *flash*. A continuación se producirá la evaporación de parte del líquido del charco, debido principalmente al aporte de calor del terreno. Esta cantidad de gas, junto con la evaporada súbitamente, formará una nube tóxica que se desplazará a través del terreno en función de la velocidad y dirección del viento.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un gran recipiente a granel (GRG) de cloro de 1.000 kg.

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de cloro líquido que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de cloro líquido por colapso de un GRG de 1.000 kg

Tras el colapso del recipiente, parte del líquido fugado sufrirá una evaporación súbita (146,8 kg) y el resto formará un charco del cual se irá evaporando como consecuencia del aporte de calor del terreno (0,556 kg/s).

Nube tóxica

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a tierra llana, huerta con pocos árboles (0,03 m).

Los alcances obtenidos para las zonas de intervención y alerta para los casos estudiados, se presentan en la tabla L.5. Hay que tener en cuenta al hablar de nubes tóxicas de las dimensiones de éstas, por ello se incluyen en la tabla L.6, las dimensiones de las nubes obtenidas, en función de la máxima anchura de la nube y a qué distancia del punto de fuga se encuentra.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFEECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Colapso GRG	Masa = 1.000 kg Q _{evap} = 0,056 kg/s Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	1.932	5.250	--

Tabla L.5. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de cloro líquido.

	Zona de Intervención		Zona de Alerta	
	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)
Colapso GRG	200	1.125	494	3.025

Tabla L.6. Dimensiones de las nubes tóxicas de cloro líquido.

Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad para nubes tóxicas se centra en muertes por inhalación. En la tabla L.7, se presentan los valores para los radios del 99%, del 50% y del 1% de probabilidad de ocurrencia de muertes por inhalación para los estudios de dispersión realizados. Las dimensiones de las nubes se dan en metros.

	COLAPSO GRG		
	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.
Muertes por inhalación			
Radio zona de probabilidad 99%	66 m	9 m	25 m
Radio zona de probabilidad 50%	136 m	18 m	75 m
Radio zona de probabilidad del 1%	283 m	36 m	150 m

Tabla L.7. Análisis de vulnerabilidad de las nubes tóxicas de cloro líquido.

ONU 1090: Acetona

La acetona, número de ONU 1090, está clasificado en el ADR como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación F1, es decir, líquidos inflamables con un punto de inflamación inferior o igual a 60°C.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de estireno. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.3) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso iniciador	Bloqueo válvulas	Ignición inmediata	Ignición retardada	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	------------------	--------------------	--------------------	-----------------	---------------

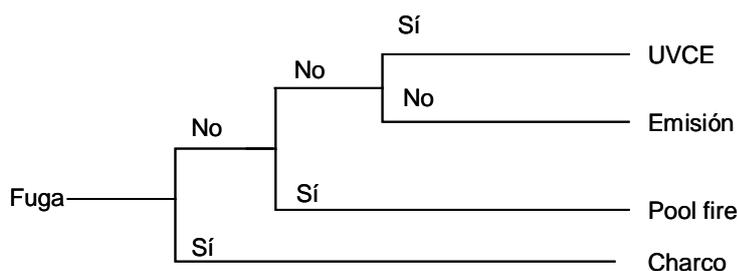


Figura L.3. Árbol de sucesos de una fuga de acetona

Tomando como suceso iniciador una fuga de acetona es decir, el derrame, todo el líquido pasa a formar parte de un charco, que en caso de que encontrase una fuente de ignición, se produciría un incendio del charco formado o *pool fire*. Por otro lado, si el charco no entrase en ignición y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido, formándose una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de acetona de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 22 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de acetona que se han planteado en el estudio son:

◇ Fuga de acetona por una perforación de 2" de diámetro de un camión cisterna.

- ▶ Diámetro del orificio 5,08 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 4,38 kg/s, que formará un charco libre de 40 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 1 kg/s.

◇ Fuga de acetona por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 67 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 4,83 kg/s.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de acetona, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.8. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de acetona y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar, o, si no la encuentra, dispersarse.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.8. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 4,38 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 1 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 40 \text{ m}$	Rad. térmica	32	45	40
		UVCE C.E. = 108 m	Sobrepresión	32	80	25
Colapso camión	Masa = 22.000 kg $Q_{evap} = 4,83 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 67 \text{ m}$	Rad. térmica	58	71	65
		UVCE C.E. = 193 m	Sobrepresión	54	135	42

Tabla L.8. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de acetona.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	20 m	34 m
Radio zona de probabilidad del 50%	23 m	39 m
Radio zona de probabilidad del 1%	35 m	58 m

Tabla L.9. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de acetona estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 50%	3 m	5 m
Radio zona de probabilidad del 1%	4 m	7 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	3 m	5 m
Radio zona de probabilidad del 50%	10 m	16 m
Radio zona de probabilidad del 1%	31 m	52 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	5 m	9 m
Radio zona de daños irreversibles	10 m	17 m
Radio zona de daños graves	27 m	45 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	44 m	74 m
Radio zona de probabilidad del 50%	102 m	171 m
Radio zona de probabilidad del 1%	233 m	393 m

Tabla L.10. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de acetona.

ONU 1202: Gasóleo o combustible para motores diesel o aceite mineral para caldeo, ligero (punto de inflamación no sobrepase los 60 °C)

El gasóleo o combustible para motores diesel o aceite mineral para caldeo, ligero (punto de inflamación no sobrepase los 60 °C), con número ONU 1202, está clasificado en el ADR, como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación F1, es decir, líquidos inflamables con un punto de inflamación inferior o igual a 60°C.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de gasóleo. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.4) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso Iniciador	Ignición Inmediata	Ignición retardada	Consecuencias
------------------	--------------------	--------------------	---------------

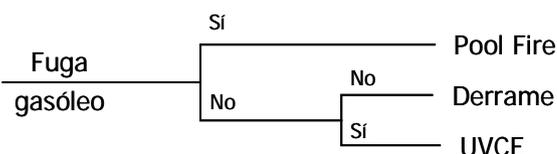


Figura L.4. Árbol de sucesos de una fuga de gasóleo

Tomando como suceso iniciador una fuga de gasóleo es decir, el derrame, todo el líquido pasa a formar parte de un charco, que en caso de que encontrase una fuente de ignición, se produciría un incendio del charco formado o *pool fire*. Por otro lado, si el charco no entrase en ignición y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido, formándose una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada). Si el líquido que forma el charco no entrase en ignición podría alcanzar canalizaciones próximas al lugar de la fuga, dando lugar a una contaminación del medio ambiente acuático, debido a su peligrosidad para el medio ambiente.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un compartimento de 12 m³ de un camión cisterna y a un camión cisterna de gasóleo de las siguientes características:

- ▶ Volumen liq 32 m³
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de gasóleo que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de gasóleo por una perforación de 2" de diámetro de un camión cisterna.
 - ▶ Diámetro del orificio 5,08 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 4,93 kg/s, que formará un charco libre de 41 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,025 kg/s.

- ◊ Fuga de gasóleo por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 72 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,14 kg/s.

- ◊ Fuga de gasóleo por colapso total de un compartimento de 12 m³

Tras el colapso del compartimento, el líquido fugado formará un charco libre de 42 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,05 kg/s.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de gasóleo, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.11. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de gasóleo y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explosionar, o, si no la encuentra, dispersarse.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.11. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 4,93 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 0,025 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 41 \text{ m}$	Rad. térmica	48	69	56
		UVCE C.E. = 18 m	Sobrepresión	16	40	13
Colapso camión	Masa = 27.151 kg $Q_{evap} = 0,14 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 72 \text{ m}$	Rad. térmica	97	134	97
		UVCE C.E. = 34 m	Sobrepresión	28	70	22
Colapso compartimento 12 m ³	Masa = 9.164 kg $Q_{evap} = 0,05 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 42 \text{ m}$	Rad. térmica	49	70	57
		UVCE C.E. = 24 m	Sobrepresión	20	50	16

Tabla L.11. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de gasóleo.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN	COLAPSO COMP.
Muertes por radiación térmica			
Radio zona de probabilidad del 99%	22 m	38 m	22 m
Radio zona de probabilidad del 50%	31 m	55 m	31 m
Radio zona de probabilidad del 1%	49 m	85 m	50 m

Tabla L.12. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de gasóleo estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irrecuperables y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha

considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN	COLAPSO COMP.
Muertes por hemorragia pulmonar			
Radio zona de probabilidad del 99%	1 m	2 m	2 m
Radio zona de probabilidad del 50%	2 m	3 m	2 m
Radio zona de probabilidad del 1%	2 m	4 m	3 m
Rotura de tímpanos			
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	3 m	2 m
Radio zona de probabilidad del 50%	5 m	9 m	6 m
Radio zona de probabilidad del 1%	16 m	28 m	20 m
Daños en estructuras			
Radio zona de total demolición	3 m	5 m	4 m
Radio zona de daños irreversibles	5 m	9 m	7 m
Radio zona de daños graves	14 m	24 m	17 m
Rotura de cristales			
Radio zona de probabilidad del 99%	22 m	39 m	28 m
Radio zona de probabilidad del 50%	50 m	89 m	64 m
Radio zona de probabilidad del 1%	116 m	205 m	146 m

Tabla L.13. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de gasóleo.

Análisis de vulnerabilidad del medio ambiente

El gasóleo es una materia clasificada por la CONCAWE como peligrosa para el medio ambiente. Concretamente se clasifica como “tóxica para los organismos acuáticos” y que “puede provocar a largo plazo efectos negativos para el medio ambiente acuático”.

Así pues, si se produce un derrame de gasóleo sin un incendio posterior, hay que tener en cuenta que el charco formado puede contaminar las zonas próximas al lugar del accidente, existiendo la posibilidad de que el líquido alcance canalizaciones de desagüe.

ONU 1203: Combustible para motores o gasolina

El combustible para motores o gasolina, número de ONU 1203, está clasificado en el ADR como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación F1, es decir, líquidos inflamables con un punto de inflamación inferior o igual a 60°C.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de gasolina. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.5) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso Iniciador	Ignición Inmediata	Ignición retardada	Consecuencias
------------------	--------------------	--------------------	---------------

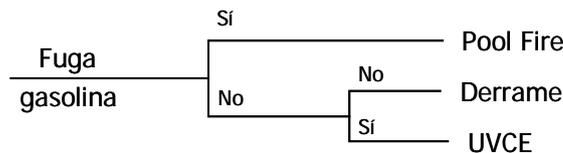


Figura L.5. Árbol de sucesos de una fuga de gasolina

Tomando como suceso iniciador una fuga de gasolina es decir, el derrame, todo el líquido pasa a formar parte de un charco, que en caso de que encontrase una fuente de ignición, se produciría un incendio del charco formado o *pool fire*. Por otro lado, si el charco no entrase en ignición y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido, formándose una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada). Si el líquido que forma el charco no entrase en ignición podría alcanzar canalizaciones próximas al lugar de la fuga, dando lugar a una contaminación del medio ambiente acuático, debido a su peligrosidad para el medio ambiente.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un compartimento de 12 m³ de un camión cisterna y a un camión cisterna de gasolina de las siguientes características.

- ▶ Volumen líq. 32 m³
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de gasolina que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de gasolina por una perforación de 2" de diámetro de un camión cisterna.
 - ▶ Diámetro del orificio 5,08 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 4,30 kg/s, que formará un charco libre de 41 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 2,86 kg/s.

- ◊ Fuga de gasolina por colapso total del camión cisterna

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 72 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 12,24 kg/s.

◇ Fuga de gasolina por colapso total de un compartimento de 12 m³

Tras el colapso del compartimento, el líquido fugado formará un charco libre de 42 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 4,44 kg/s.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de gasolina, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.14. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de gasolina y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explosionar, o, si no la encuentra, dispersarse.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.14. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 4,93 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 0,025 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 41 \text{ m}$	Rad. térmica	104	148	60
		UVCE C.E. = 116m	Sobrepresión	71	177	56
Colapso camión	Masa = 23.693 kg $Q_{evap} = 12,2 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 72 \text{ m}$	Rad. térmica	177	248	104
		UVCE C.E. = 199 m	Sobrepresión	115	287	90
Colapso compartimento 12 m ³	Masa = 8 Tm $Q_{evap} = 4,44 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 42 \text{ m}$	Rad. térmica	106	150	61
		UVCE C.E. = 134 m	Sobrepresión	81	201	63

Tabla L.14. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de gasolina.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN	COLAPSO COMP.
Muertes por radiación térmica			
Radio zona de probabilidad del 99%	22 m	39 m	22 m
Radio zona de probabilidad del 50%	32 m	58 m	33 m
Radio zona de probabilidad del 1%	52 m	92 m	53 m

Tabla L.15. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de gasolina estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha

considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN	COLAPSO COMP.
Muertes por hemorragia pulmonar			
Radio zona de probabilidad del 99%	5 m	7 m	5 m
Radio zona de probabilidad del 50%	7 m	10 m	7 m
Radio zona de probabilidad del 1%	9 m	14 m	10 m
Rotura de tímpanos			
Radio zona de probabilidad del 99%	7 m	10 m	7 m
Radio zona de probabilidad del 50%	21 m	34 m	24 m
Radio zona de probabilidad del 1%	69 m	111 m	78 m
Daños en estructuras			
Radio zona de total demolición	12 m	18 m	13 m
Radio zona de daños irreversibles	23 m	36 m	26 m
Radio zona de daños graves	59 m	96 m	67 m
Rotura de cristales			
Radio zona de probabilidad del 99%	98 m	158 m	111 m
Radio zona de probabilidad del 50%	224 m	364 m	255 m
Radio zona de probabilidad del 1%	517 m	838 m	586 m

Tabla L.16. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de gasolina.

Análisis de vulnerabilidad del medio ambiente

La gasolina es una materia clasificada por la CONCAWE como peligrosa para el medio ambiente. Concretamente se clasifica como “tóxica para los organismos acuáticos” y que “puede provocar a largo plazo efectos negativos para el medio ambiente acuático”.

Así pues, si se produce un derrame de gasóleo sin un incendio posterior, hay que tener en cuenta que el charco formado puede contaminar las zonas próximas al lugar del accidente, existiendo la posibilidad de que el líquido alcance canalizaciones de desagüe.

ONU 1131: Disulfuro de carbono

El disulfuro de carbono, con número ONU 1131, está clasificado en el ADR, como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación FT1, es decir, tóxico además de inflamable.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de disulfuro de carbono. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.6) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso iniciador	Bloqueo válvulas	Ignición inmediata	Ignición retardada	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	------------------	--------------------	--------------------	-----------------	---------------

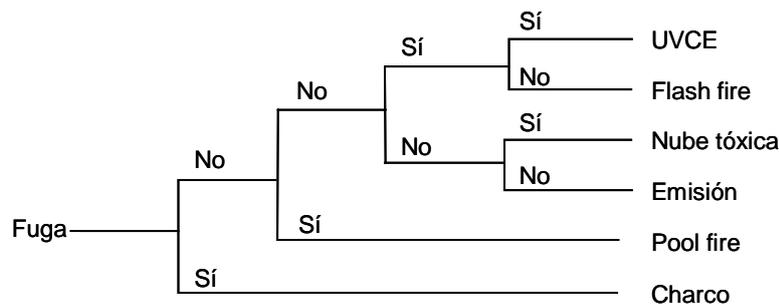


Figura L.6. Árbol de sucesos de una fuga de disulfuro de carbono

Tomando como suceso iniciador una fuga de disulfuro de carbono, el líquido que se derramase formaría un charco, que podría incendiarse si encontrase alguna fuente de ignición cercana, dando lugar a un incendio de charco o pool fire. En caso contrario, y si las condiciones meteorológicas lo favoreciesen, se podría producir la evaporación de parte del líquido del charco, formándose una nube tóxica, que si encontrase una fuente de ignición daría lugar a una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de disulfuro de carbono de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 25 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de disulfuro de carbono que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de disulfuro de carbono por una perforación de 2" de diámetro en un camión cisterna.

- ▶ Diámetro del orificio 50,8 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 5,99 kg/s, que formará un charco libre de 37 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 1,88 kg/s.

- ◊ Fuga de disulfuro de carbono por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 54 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 6,81 kg/s.

Nube tóxica

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a tierra llana, huerta con pocos árboles (0,03 m).

Los alcances obtenidos para las zonas de intervención y alerta para los casos estudiados, se presentan en la tabla L.17. Hay que tener en cuenta al hablar de nubes tóxicas de las dimensiones de éstas, por ello se incluyen en la tabla L.18, las dimensiones de las nubes obtenidas, en función de la máxima anchura de la nube y a qué distancia del punto de fuga se encuentra.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de disulfuro de carbono, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.17. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de disulfuro de carbono y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar, o, si no la encuentra, simplemente dispersarse dando lugar a una nube tóxica.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.17. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión cisterna	$Q_{fuga} = 5,9 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 1,8 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	302	2.666	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 37 \text{ m}$	Rad. térmica	22	31	28
		UVCE C.E. = 59 m	Sobrepresión	31	78	25
Colapso camión cisterna	Masa = 25.000 kg $Q_{evap} = 6,81 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	651	5.741	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 54 \text{ m}$	Rad. térmica	33	46	41
		UVCE C.E. = 95 m	Sobrepresión	48	119	38

Tabla L.17. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de disulfuro de carbono.

	Zona de Intervención		Zona de Alerta	
	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)
Perf. 2" camión cisterna	38	170	270	1.551
Colapso camión cisterna	75	370	542	3.341

Tabla L.18. Dimensiones de las nubes tóxicas de disulfuro de carbono.

Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad para nubes tóxicas se centra en muertes por inhalación. En la tabla L.19, se presentan los valores para los radios del 99%, del 50% y del 1% de probabilidad de ocurrencia de muertes por inhalación para los estudios de dispersión realizados. Las dimensiones de las nubes se dan en metros.

	PERFORACIÓN 2" CAMIÓN CISTERNA			COLAPSO TOTAL CAMIÓN CISTERNA		
	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.
Muertes por inhalación						
Radio zona de probabilidad 99%	28 m	4 m	10 m	57 m	9 m	30 m
Radio zona de probabilidad 50%	38 m	6 m	20 m	78 m	11 m	40 m
Radio zona de probabilidad del 1%	51 m	8 m	30 m	108 m	15 m	60 m

Tabla L.19. Análisis de vulnerabilidad de las nubes tóxicas de disulfuro de carbono.

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	19 m	27 m
Radio zona de probabilidad del 50%	19 m	28 m
Radio zona de probabilidad del 1%	25 m	36 m

Tabla L.20. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de disulfuro de carbono estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 50%	3 m	5 m
Radio zona de probabilidad del 1%	4 m	6 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	5 m
Radio zona de probabilidad del 50%	9 m	14 m
Radio zona de probabilidad del 1%	30 m	46 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	5 m	8 m
Radio zona de daños irreversibles	10 m	15 m
Radio zona de daños graves	26 m	40 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	43 m	66 m
Radio zona de probabilidad del 50%	99 m	151 m
Radio zona de probabilidad del 1%	227 m	347 m

Tabla L.21. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de disulfuro de carbono.

ONU 1170: Etanol

El etanol, número de ONU 1170, está clasificado en el ADR como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación F1, es decir, líquidos inflamables con un punto de inflamación inferior o igual a 60°C.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de etanol. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.7) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso iniciador	Bloqueo válvulas	Ignición inmediata	Ignición retardada	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	------------------	--------------------	--------------------	-----------------	---------------

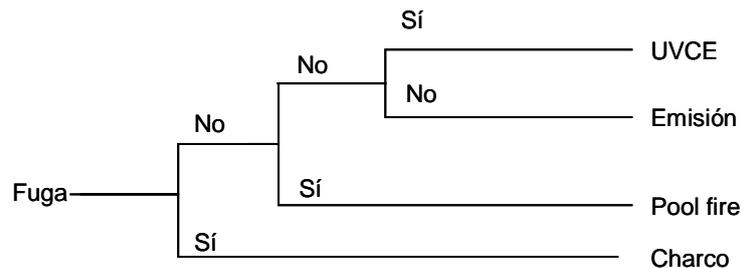


Figura L.7. Árbol de sucesos de una fuga de etanol

Tomando como suceso iniciador una fuga de etanol es decir, el derrame, todo el líquido pasa a formar parte de un charco, que en caso de que encontrase una fuente de ignición, se produciría un incendio del charco formado o *pool fire*. Por otro lado, si el charco no entrase en ignición y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido, formándose una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de etanol de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 25 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de etanol que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de etanol por una perforación de 2" de diámetro de un camión cisterna.
 - ▶ Diámetro del orificio 5,08 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 4,57 kg/s, que formará un charco libre de 41 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,20 kg/s.

- ◊ Fuga de etanol por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 71 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 1,12 kg/s.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de etanol, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.22. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de etanol y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar, o, si no la encuentra, dispersarse.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.22. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 4,57 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 0,20 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 41 \text{ m}$	Rad. térmica	28	38	37
		UVCE C.E. = 47 m	Sobrepresión	17	43	14
Colapso camión	Masa = 25.000 kg $Q_{evap} = 1,12 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 71 \text{ m}$	Rad. térmica	53	71	61
		UVCE C.E. = 89 m	Sobrepresión	30	75	24

Tabla L.22. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de etanol.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	21 m	36 m
Radio zona de probabilidad del 50%	22 m	39 m
Radio zona de probabilidad del 1%	32 m	54 m

Tabla L.23. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de etanol estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	2 m
Radio zona de probabilidad del 50%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 1%	3 m	4 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 50%	5 m	9 m
Radio zona de probabilidad del 1%	17 m	29 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	3 m	5 m
Radio zona de daños irreversibles	6 m	10 m
Radio zona de daños graves	15 m	25 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	24 m	41 m
Radio zona de probabilidad del 50%	54 m	95 m
Radio zona de probabilidad del 1%	124 m	218 m

Tabla L.24. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de etanol.

ONU 1173: Acetato de etilo

El acetato de etilo, número de ONU 1173, está clasificado en el ADR como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación F1, es decir, líquidos inflamables con un punto de inflamación inferior o igual a 60°C.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de acetato de etilo. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.8) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso iniciador	Bloqueo válvulas	Ignición inmediata	Ignición retardada	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	------------------	--------------------	--------------------	-----------------	---------------

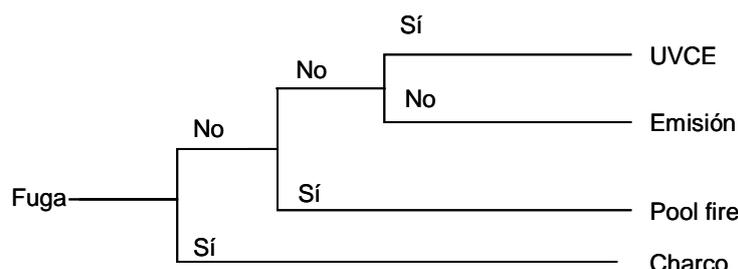


Figura L.8. Árbol de sucesos de una fuga de acetato de etilo

Tomando como suceso iniciador una fuga de acetato es decir, el derrame, todo el líquido pasa a formar parte de un charco, que en caso de que encontrase una fuente de ignición, se produciría un incendio del charco formado o *pool fire*. Por otro lado, si el charco no entrase en ignición y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido, formándose una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de acetato de etilo de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 24 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de acetato de etilo que se han planteado en el estudio son:

- ◇ Fuga de acetato de etilo por una perforación de 2" de diámetro de un camión cisterna.
 - ▶ Diámetro del orificio 5,08 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 4,76 kg/s, que formará un charco libre de 39 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,59 kg/s.

- ◇ Fuga de acetato de etilo por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 66 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 2,94 kg/s.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de acetato de etilo, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.25. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de acetato de etilo y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar, o, si no la encuentra, dispersarse.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.25. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 4,76 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 0,59 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 39 \text{ m}$	Rad. térmica	30	43	38
		UVCE C.E. = 67 m	Sobrepresión	27	67	21
Colapso camión	Masa = 24.000 kg $Q_{evap} = 2,94 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 66 \text{ m}$	Rad. térmica	55	77	62
		UVCE C.E. = 120 m	Sobrepresión	46	114	36

Tabla L.25. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de acetato de etilo.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	20 m	33 m
Radio zona de probabilidad del 50%	21 m	36 m
Radio zona de probabilidad del 1%	33 m	55 m

Tabla L.26. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de acetato de etilo estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 50%	3 m	4 m
Radio zona de probabilidad del 1%	4 m	6 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	3 m	4 m
Radio zona de probabilidad del 50%	8 m	14 m
Radio zona de probabilidad del 1%	26 m	44 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	5 m	8 m
Radio zona de daños irreversibles	9 m	15 m
Radio zona de daños graves	23 m	38 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	37 m	63 m
Radio zona de probabilidad del 50%	84 m	144 m
Radio zona de probabilidad del 1%	194 m	331 m

Tabla L.27. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de acetato de etilo.

ONU 1230: Metanol

El metanol, con número ONU 1230, está clasificado en el ADR, como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación FT1, es decir, tóxico además de inflamable.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de metanol. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.9) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso iniciador	Bloqueo válvulas	Ignición inmediata	Ignición retardada	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	------------------	--------------------	--------------------	-----------------	---------------

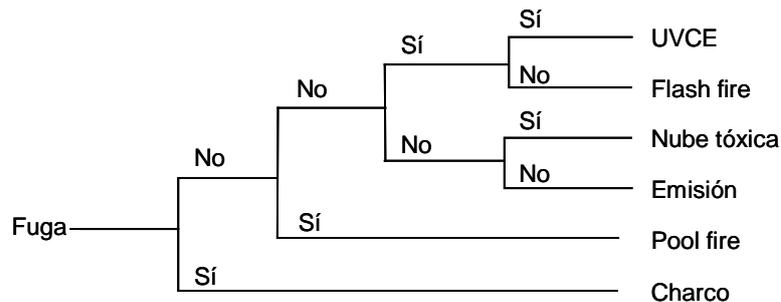


Figura L.9. Árbol de sucesos de una fuga de metanol

Tomando como suceso iniciador una fuga de metanol, el líquido que se derramase formaría un charco, que podría incendiarse si encontrase alguna fuente de ignición cercana, dando lugar a un incendio de charco o pool fire. En caso contrario, y si las condiciones meteorológicas lo favoreciesen, se podría producir la evaporación de parte del líquido del charco, formándose una nube tóxica, que si encontrase una fuente de ignición daría lugar a una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de metanol de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 24 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de metanol que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de metanol por una perforación de 2" de diámetro en un camión cisterna.
 - ▶ Diámetro del orificio 50,8 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 4,58 kg/s, que formará un charco libre de 41 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,30 kg/s.

- ◊ Fuga de metanol por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 69 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 1,57 kg/s.

Nube tóxica

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a tierra llana, huerta con pocos árboles (0,03 m).

Los alcances obtenidos para las zonas de intervención y alerta para los casos estudiados, se presentan en la tabla L.28. Hay que tener en cuenta al hablar de nubes tóxicas de las dimensiones de éstas, por ello se incluyen en la tabla L.29, las dimensiones de las nubes obtenidas, en función de la máxima anchura de la nube y a qué distancia del punto de fuga se encuentra.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de metanol, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.28. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de metanol y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar, o, si no la encuentra, simplemente dispersarse dando lugar a una nube tóxica.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.28. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión cisterna	$Q_{fuga} = 4,9 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = \text{kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	30	85	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 41 \text{ m}$	Rad. térmica	22	29	28
		UVCE C.E. = 46 m	Sobrepresión	14	35	11
Colapso camión cisterna	Masa = 24.000 kg $Q_{evap} = 1,57 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	79	223	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 69 \text{ m}$	Rad. térmica	39	51	47
		UVCE C.E. = 84 m	Sobrepresión	24	60	19

Tabla L.28. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de metanol.

	Zona de Intervención		Zona de Alerta	
	ANCHURA MÁXIMA (m)	DISTANCIA (m)	ANCHURA MÁXIMA (m)	DISTANCIA (m)
Perf. 2" camión cisterna	5	17	12	48
Colapso camión cisterna	12	45	29	129

Tabla L.29. Dimensiones de las nubes tóxicas de metanol.

Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad para nubes tóxicas se centra en muertes por inhalación. En la tabla L.30, se presentan los valores para los radios del 99%, del 50% y del 1% de probabilidad de ocurrencia de muertes por inhalación para los estudios de dispersión realizados. Las dimensiones de las nubes se dan en metros.

	PERFORACIÓN 2" CAMIÓN CISTERNA			COLAPSO TOTAL CAMIÓN CISTERNA		
	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.
Muertes por inhalación						
Radio zona de probabilidad 99%	5 m	1 m	4 m	10 m	2 m	6 m
Radio zona de probabilidad 50%	8 m	2 m	4 m	19 m	3 m	12 m
Radio zona de probabilidad del 1%	15 m	3 m	7 m	38 m	6 m	21 m

Tabla L.30. Análisis de vulnerabilidad de las nubes tóxicas de metanol.

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	21 m	35 m
Radio zona de probabilidad del 50%	21 m	35 m
Radio zona de probabilidad del 1%	26 m	43 m

Tabla L.31. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de metanol estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irrecuperables y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	1 m	2 m
Radio zona de probabilidad del 50%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 1%	2 m	3 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 50%	4 m	7 m
Radio zona de probabilidad del 1%	14 m	23 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	3 m	4 m
Radio zona de daños irreversibles	5 m	8 m
Radio zona de daños graves	12 m	20 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	19 m	33 m
Radio zona de probabilidad del 50%	44 m	76 m
Radio zona de probabilidad del 1%	100 m	174 m

Tabla L.32. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de metanol.

ONU 1789: Ácido clorhídrico

El ácido clorhídrico, con número ONU 1789, está clasificado en el ADR como un líquido corrosivo clase 8, con código de clasificación C1, es decir, materia líquida corrosiva de carácter ácido.

Tomando como suceso iniciador el derrame de ácido clorhídrico, todo el líquido que se derrame formará un charco altamente corrosivo.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un gran recipiente a granel (GRG) de 1.000 kg y a un camión cisterna de ácido clorhídrico al 30%, de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 25 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de ácido clorhídrico al 30%, que se han planteado en el estudio son:

◊ Fuga de ácido clorhídrico por una perforación de 2" de diámetro en un camión cisterna.

- ▶ Diámetro del orificio 50,8 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 5,9 kg/s, que formará un charco libre de 39 metros de diámetro.

◊ Fuga de ácido clorhídrico por colapso total del vagón cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 59 metros de diámetro.

◊ Fuga de ácido clorhídrico por colapso de un GRG de 1.000 kg.

Tras el colapso del GRG, el líquido fugado formará un charco libre de 12 metros de diámetro.

Los resultados obtenidos del cálculo de consecuencias se resumen en la siguiente tabla:

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFFECTO CALCULADO	Z.I. (m)
Perf. 2" camión	Presión atmosférica Temp. ambiente Fuga = 5,9 kg/s Duración = 30 min	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	35
Colapso camión	Presión atmosférica Temp. ambiente Cantidad = 25.000 kg	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	47
Colapso GRG	Presión atmosférica Temp. ambiente Cantidad = 1.000 kg	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	12

Tabla L.33. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de ácido clorhídrico al 30%.

La zona de intervención está definida como un círculo de un radio igual al indicado en la tabla anterior, en metros, y cuyo centro es el punto de fuga.

ONU 1791: Hipocloritos en solución

Los hipocloritos en solución, con número ONU 1791, están clasificados en el ADR como líquidos corrosivos clase 8, con código de clasificación C9, es decir, materias corrosivas

líquidas. Dentro de este grupo uno de los más transportados es el hipoclorito sódico, para el que se ha llevado a cabo el análisis de consecuencias.

Tomando como suceso iniciador el derrame de hipoclorito sódico, todo el líquido que se derrame formará un charco altamente corrosivo.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un gran recipiente a granel (GRG) de 1.250 kg y a un camión cisterna de hipoclorito sódico, de las siguientes características.

▶ Cantidad	24 Tm
▶ Longitud	14 m
▶ Temperatura	ambiente
▶ Presión	atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de hipoclorito sódico, que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de hipoclorito sódico por una perforación de 2" de diámetro en un camión cisterna.

▶ Diámetro del orificio	50,8 mm
▶ Duración de la fuga	30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 5,9 kg/s, que formará un charco libre de 38 metros de diámetro.

- ◊ Fuga de hipoclorito sódico por colapso total del vagón cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 56 metros de diámetro.

- ◊ Fuga de hipoclorito sódico por colapso de un GRG de 1.250 kg.

Tras el colapso del GRG, el líquido fugado formará un charco libre de 13 metros de diámetro.

Los resultados obtenidos del cálculo de consecuencias se resumen en la siguiente tabla:

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFFECTO CALCULADO	Z.I. (m)
Perf. 2" camión	Presión atmosférica Temp. ambiente Fuga = 5,9 kg/s Duración = 30 min	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	38
Colapso camión	Presión atmosférica Temp. ambiente Cantidad = 24.000 kg	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	56
Colapso GRG	Presión atmosférica Temp. ambiente Cantidad = 1.250 kg	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	13

Tabla L.34. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de hipoclorito sódico.

La zona de intervención está definida como un círculo de un radio igual al indicado en la tabla anterior, en metros, y cuyo centro es el punto de fuga.

ONU 1824: Hidróxido sódico en solución

El hidróxido sódico en solución, con número ONU 1830, está clasificado en el ADR como un líquido corrosivo clase 8, con código de clasificación C5, es decir, materia líquida corrosiva de carácter básico.

Tomando como suceso iniciador un derrame de hidróxido sódico, todo el líquido que se derrame formará un charco altamente corrosivo.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de hidróxido sódico, al 50%, de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 25 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de hidróxido sódico en solución que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de una disolución de hidróxido sódico al 50% por una perforación de 2" de diámetro en un camión cisterna.

- ▶ Diámetro del orificio 50,8 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 7 kg/s, que formará un charco libre de 37 metros de diámetro.

- ◇ Fuga de una disolución de hidróxido sódico al 50% por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso de la cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 52 metros de diámetro.

Los resultados obtenidos del cálculo de consecuencias se resumen en la siguiente tabla:

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFEECTO CALCULADO	Z.I. (m)
Perf. 2" cisterna	Presión atmosférica Temp. ambiente Fuga = 7 kg/s Duración = 30 min	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	37
Colapso cisterna	Presión atmosférica Temp. ambiente Cantidad = 25.000 kg	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	52

Tabla L.35. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de una disolución de hidróxido sódico al 50%.

La zona de intervención está definida como un círculo de un radio igual al indicado en la tabla anterior, en metros, y cuyo centro es el punto de fuga.

ONU 1830: Ácido sulfúrico conteniendo más del 51% de ácido

El ácido sulfúrico, con número ONU 1830, está clasificado en el ADR como un líquido corrosivo clase 8, con código de clasificación C1, es decir, materia líquida corrosiva de carácter ácido.

Tomando como suceso iniciador el derrame de ácido sulfúrico, todo el líquido que se derrame formará un charco altamente corrosivo.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de ácido sulfúrico al 98%, de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 25 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente

► Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de ácido sulfúrico al 98%, que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de ácido sulfúrico por una perforación de 2" de diámetro en un camión cisterna.

- Diámetro del orificio 50,8 mm
- Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 7,8 kg/s, que formará un charco libre de 35 metros de diámetro.

- ◊ Fuga de ácido sulfúrico por colapso total de un camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 47 metros de diámetro.

Los resultados obtenidos del cálculo de consecuencias se resumen en la siguiente tabla:

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)
Perf. 2" camión	Presión atmosférica Temp. ambiente Fuga = 7,8 kg/s Duración = 30 min	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	35
Colapso camión	Presión atmosférica Temp. ambiente Cantidad = 25.000 kg	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	47

Tabla L.36. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de ácido sulfúrico al 98%.

La zona de intervención está definida como un círculo de un radio igual al indicado en la tabla anterior, en metros, y cuyo centro es el punto de fuga.

ONU 1965: Mezcla de hidrocarburos gaseosos licuados, n.e.p.

El número ONU 1695 corresponde a mezclas de hidrocarburos gaseosos licuados. Estos hidrocarburos están clasificados según el ADR como gases dentro de la clase 2, con código de clasificación 2F, es decir, gases inflamables. Dentro de este número ONU los productos más comercializados y transportados son propano y butano, razón por la que se ha llevado cabo el análisis de consecuencias para ambas sustancias.

El alcance de las consecuencias de un accidente con propano o butano depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.10) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

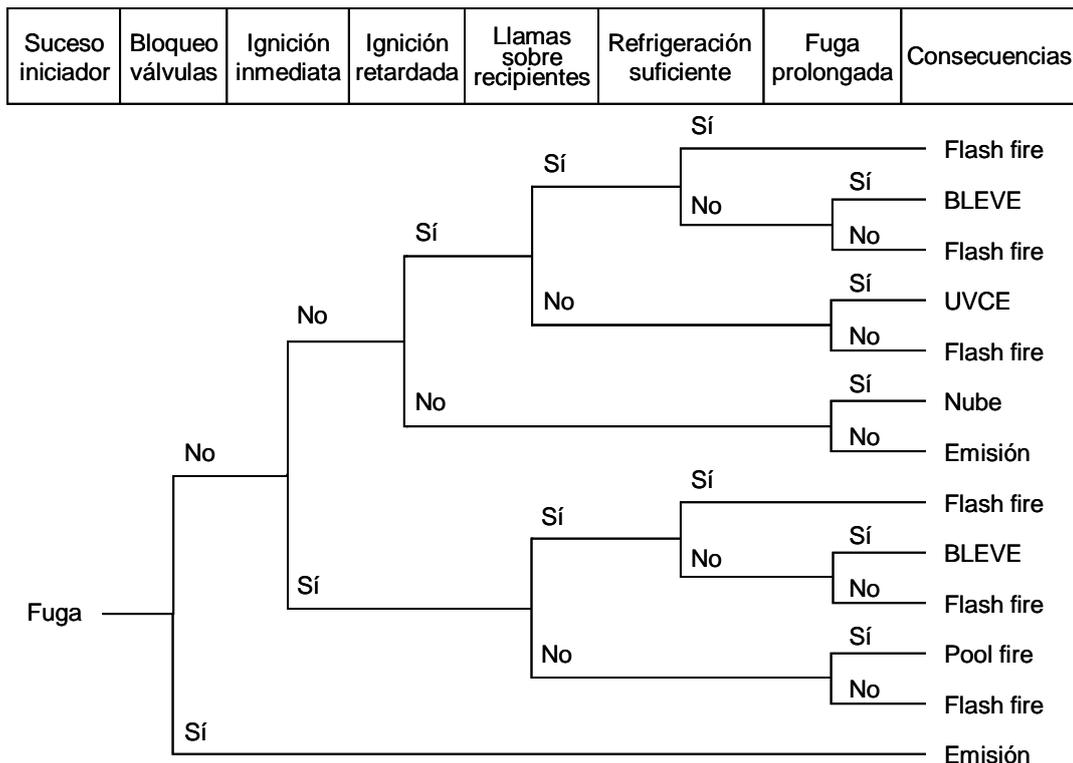


Figura L.10. Árbol de sucesos de una fuga de butano/propano.

Tomando como suceso iniciador la fuga de propano o butano (gas licuado bajo presión), es decir, el derrame, como la temperatura del fluido es muy inferior a la temperatura ambiente, una parte del líquido que escapa pasa a fase gaseosa instantáneamente, sufriendo lo que se denomina evaporación súbita o flash. El resto del líquido formaría un charco que en caso de que entrase en ignición, daría lugar a un incendio del charco o *pool fire*.

En caso negativo, y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido del charco, debido principalmente al aporte de calor del terreno. Esta cantidad de gas, junto con la evaporada súbitamente, formaría una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

En el supuesto de que la fuga se produzca en la parte del gas del recipiente, se produciría un dardo que en caso de incendiarse formaría un dardo de fuego (*jet fire*).

Por último, como consecuencia de un incendio cerca del recipiente, se podría producir un BLEVE del mismo.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de las siguientes características.

- | | |
|---------------|------------|
| ▶ Cantidad | 23 Tm |
| ▶ Longitud | 14 m |
| ▶ Temperatura | ambiente |
| ▶ Presión | saturación |

Propano

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de propano que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de propano líquido por una perforación de 2" de diámetro en la zona de líquido de un camión cisterna.

- | | |
|-------------------------|------------|
| ▶ Diámetro del orificio | 50,8 mm |
| ▶ Duración de la fuga | 10 minutos |

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 29,60 kg/s. Una parte del mismo sufrirá una evaporación súbita (8,19 kg/s) y el resto (21,41 kg/s) formará un charco de 64 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia del aporte de calor del terreno (28,40 kg/s). Se ha considerado una duración de la fuga de 10 minutos de duración porque para tiempos superiores a 13 minutos se vacía completamente la cisterna.

- ◊ Fuga de propano gas por una perforación de 2" de diámetro en la zona de gas de un camión cisterna.

- | | |
|-------------------------|------------|
| ▶ Diámetro del orificio | 50,8 mm |
| ▶ Duración de la fuga | 10 minutos |

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 2,105 kg/s.

- ◊ Fuga de propano líquido por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, parte del líquido fugado sufrirá una evaporación súbita (5.725,10 kg) y el resto formará un charco de 79 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia del aporte de calor del terreno (7,93 kg/s).

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a tierra llana, huerta con pocos árboles (0,03 m).

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce una fuga de propano, parte se evapora instantáneamente y el resto forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.37. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Dardo de fuego

Al tratarse el propano de un gas presurizado, en el supuesto de que la fuga se produzca en la parte del gas del vagón cisterna, se produciría un dardo que en caso de incendiarse formaría un dardo de fuego (*jet fire*).

Para el cálculo de la radiación emitida por un dardo de fuego es necesario conocer dos ángulos:

- ◇ el ángulo entre la dirección del viento y el vector normal al recipiente, en el plano horizontal, y
- ◇ el ángulo entre el eje del agujero y la horizontal.

Se han tomado los valores más desfavorables. El primero de ellos, ocurre cuando el viento sopla perpendicularmente al vagón, es decir, 0°. Y para el segundo, se ha tomado el valor de 31°, tras realizar un estudio en el que se buscaba el ángulo que daba mayores valores de las zonas de objeto de planificación.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), de la zona de alerta (Z.A.) y de la zona del efecto dominó (E.D.) para los estudios analizados se encuentran recogidos en la tabla L.37.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Como se ha comentado anteriormente, cuando hay una fuga de propano líquido, una parte sufre una evaporación súbita o *flash* y el resto forma un charco. En caso de no producirse la ignición, parte de este se evapora formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar. El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los cálculos que se han realizado están basados en este caso más desfavorable. Los valores obtenidos (en metros) para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.37. Este valor C.E. es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

BLEVE

Se han calculado (tabla L.37) las zonas de intervención, de alerta y del efecto dominó para la radiación térmica y la sobrepresión, así como una estimación del alcance de los proyectiles considerando que el 4% de la energía se utiliza para este fin y el resto para la formación de ondas de presión.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 29,6 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 28,4 \text{ kg/s}$ Duración = 10 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 64 \text{ m}$	Rad. térmica	135	192	103
		UVCE C.E. = 235 m	Sobrepresión	80	200	63
Perf. 2" zona gas camión	$Q_{descarga} = 2,1 \text{ kg/s}$ Duración = 10 min	DARDO DE FUEGO	Rad. térmica	--	7,94	--
Colapso camión	Masa = 20.000 kg $Q_{evap} = 7,93 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 79 \text{ m}$	Rad. térmica	168	237	129
		UVCE C.E. = 249 m	Sobrepresión	85	211	66
		BLEVE	Rad. térmica Sobrepresión Proyectiles	345 52 --	489 94 --	456 44 --

Tabla L.37. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de propano líquido.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En las siguientes tablas se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	37 m	46 m
Radio zona de probabilidad del 50%	57 m	72 m
Radio zona de probabilidad del 1%	91 m	114 m

Tabla L.38. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de propano líquido estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. LIQ. CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	5 m	6 m
Radio zona de probabilidad del 50%	7 m	8 m
Radio zona de probabilidad del 1%	10 m	11 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	7 m	8 m
Radio zona de probabilidad del 50%	24 m	25 m
Radio zona de probabilidad del 1%	78 m	82 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	13 m	14 m
Radio zona de daños irreversibles	25 m	27 m
Radio zona de daños graves	67 m	71 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	110 m	116 m
Radio zona de probabilidad del 50%	254 m	268 m
Radio zona de probabilidad del 1%	584 m	617 m

Tabla L.39. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de propano líquido.

En el caso de BLEVE, se obtienen consecuencias de la radiación y consecuencias de la sobrepresión.

CAMIÓN	
Efectos de la radiación térmica	
Muertes por radiación térmica	
Radio zona de probabilidad del 99%	241 m
Radio zona de probabilidad del 50%	293 m
Radio zona de probabilidad del 1%	373 m
Efectos de la sobrepresión	
Muertes por hemorragia pulmonar	
Radio zona de probabilidad del 99%	11 m
Radio zona de probabilidad del 50%	13 m
Radio zona de probabilidad del 1%	15 m
Rotura de tímpanos	
Radio zona de probabilidad del 99%	13 m
Radio zona de probabilidad del 50%	24 m
Radio zona de probabilidad del 1%	51 m
Daños en estructuras	
Radio zona de total demolición	17 m
Radio zona de daños irreversibles	25 m
Radio zona de daños graves reparables	46 m
Rotura de cristales	
Radio zona de probabilidad del 99%	64 m
Radio zona de probabilidad del 50%	110 m
Radio zona de probabilidad del 1%	170 m

Tabla 40. Análisis de vulnerabilidad de BLEVEs de propano líquido.

Butano

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de butano que se han planteado en el estudio son:

- ◇ Fuga de butano líquido por una perforación de 2" de diámetro en la zona de líquido de un camión cisterna.
 - ▶ Diámetro del orificio 50,8 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 10,88 kg/s. Una parte del mismo sufrirá una evaporación súbita (0,90 kg/s) y el resto (9,98 kg/s) formará un charco de 70 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia del aporte de calor del terreno (10,24 kg/s).

◊ Fuga de butano gas por una perforación de 2" de diámetro en la zona de gas de un camión cisterna.

- ▶ Diámetro del orificio 50,8 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 0,542 kg/s.

◊ Fuga de butano líquido por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, parte del líquido fugado sufrirá una evaporación súbita (1.740,5 kg) y el resto formará un charco de 74 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia del aporte de calor del terreno (10,14 kg/s).

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a tierra llana, huerta con pocos árboles (0,03 m).

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce una fuga de butano, parte se evapora instantáneamente y el resto forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.41. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Dardo de fuego

Al tratarse el butano de un gas presurizado, en el supuesto de que la fuga se produzca en la parte del gas del vagón cisterna, se produciría un dardo que en caso de incendiarse formaría un dardo de fuego (*jet fire*).

Para el cálculo de la radiación emitida por un dardo de fuego es necesario conocer dos ángulos:

- ◇ el ángulo entre la dirección del viento y el vector normal al recipiente, en el plano horizontal, y
- ◇ el ángulo entre el eje del agujero y la horizontal.

Se han tomado los valores más desfavorables. El primero de ellos, ocurre cuando el viento sopla perpendicularmente al vagón, es decir, 0° . Y para el segundo, se ha tomado el valor de 31° , tras realizar un estudio en el que se buscaba el ángulo que daba mayores valores de las zonas de objeto de planificación.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), de la zona de alerta (Z.A.) y de la zona del efecto dominó (E.D.) para los estudios analizados se encuentran recogidos en la tabla L.41.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Como se ha comentado anteriormente, cuando hay una fuga de butano líquido, una parte sufre una evaporación súbita o *flash* y el resto forma un charco. En caso de no producirse la ignición, parte de este se evapora formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explosionar. El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los cálculos que se han realizado están basados en este caso más desfavorable. Los valores obtenidos (en metros) para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.41. Este valor C.E. es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

BLEVE

Se han calculado (tabla L.41) las zonas de intervención, de alerta y del efecto dominó para la radiación térmica y la sobrepresión, así como una estimación del alcance de los proyectiles considerando que el 4% de la energía se utiliza para este fin y el resto para la formación de ondas de presión.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 10,88 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 10,24 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 70 \text{ m}$	Rad. térmica	159	224	112
		UVCE C.E. = 227 m	Sobrepresión	89	221	70
Perf. 2" zona gas camión	$Q_{descarga} = 0,54 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	DARDO DE FUEGO	Rad. térmica	--	2	--
Colapso camión	Masa = 20.000 kg $Q_{evap} = 10,14 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 74 \text{ m}$	Rad. térmica	167	236	119
		UVCE C.E. = 232 m	Sobrepresión	91	228	71
		BLEVE	Rad. térmica Sobrepresión Proyectiles	343 31 --	488 57 --	455 27 --

Tabla L.41. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de butano líquido.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En las siguientes tablas se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	40 m	42 m
Radio zona de probabilidad del 50%	62 m	66 m
Radio zona de probabilidad del 1%	99 m	104 m

Tabla L.42. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de butano líquido estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%,

50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. LIQ. CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	6 m	6 m
Radio zona de probabilidad del 50%	8 m	8 m
Radio zona de probabilidad del 1%	11 m	12 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	8 m	8 m
Radio zona de probabilidad del 50%	26 m	27 m
Radio zona de probabilidad del 1%	86 m	88 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	14 m	15 m
Radio zona de daños irreversibles	28 m	29 m
Radio zona de daños graves	74 m	76 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	122 m	125 m
Radio zona de probabilidad del 50%	281 m	289 m
Radio zona de probabilidad del 1%	646 m	664 m

Tabla L.43. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de butano líquido.

En el caso de BLEVE, se obtienen consecuencias de la radiación y consecuencias de la sobrepresión.

CAMIÓN	
Efectos de la radiación térmica	
Muertes por radiación térmica	
Radio zona de probabilidad del 99%	240 m
Radio zona de probabilidad del 50%	293 m
Radio zona de probabilidad del 1%	373 m
Efectos de la sobrepresión	
Muertes por hemorragia pulmonar	
Radio zona de probabilidad del 99%	7 m
Radio zona de probabilidad del 50%	8 m
Radio zona de probabilidad del 1%	9 m
Rotura de tímpanos	
Radio zona de probabilidad del 99%	8 m
Radio zona de probabilidad del 50%	15 m
Radio zona de probabilidad del 1%	31 m
Daños en estructuras	
Radio zona de total demolición	11 m
Radio zona de daños irreversibles	15 m
Radio zona de daños graves reparables	28 m
Rotura de cristales	
Radio zona de probabilidad del 99%	39 m
Radio zona de probabilidad del 50%	67 m
Radio zona de probabilidad del 1%	103 m

Tabla L.44. Análisis de vulnerabilidad de BLEVEs de butano líquido.

ONU 2014: Peróxido de hidrógeno en solución acuosa

El peróxido de hidrógeno en solución acuosa con un mínimo del 20% y un máximo del 60% de peróxido de hidrógeno (estabilizado según las necesidades), con número ONU 2014, está clasificado en el ADR, como una materia comburente clase 5.1, con código de clasificación OC1, es decir, comburente y corrosivo.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce una reacción de autodescomposición de agua oxigenada. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.11) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso Iniciador	Alivio de presión	Consecuencias
------------------	-------------------	---------------

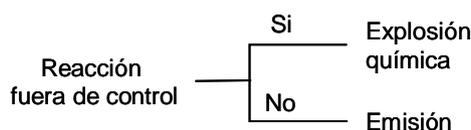


Figura L.11. Árbol de sucesos de una reacción fuera de control de peróxido de hidrógeno.

Durante el proceso de transporte, el peróxido de hidrógeno, también denominado agua oxigenada, puede sufrir por efecto del calor o de la presencia de impurezas o por efecto de la temperatura, un proceso de autodescomposición en el que se libera gran cantidad de energía, y que puede acabar en una explosión. Como la energía procede de una reacción química exotérmica, la explosión será química.

Las hipótesis consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de peróxido de hidrógeno con las siguientes características.

- ▶ Cantidad 25 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Con el peróxido de hidrógeno el suceso iniciador no es la rotura y consiguiente fuga de agua oxigenada, sino cualquier incidente que suponga un calentamiento del contenido del recipiente y que inicie la descomposición, ocasionando la explosión química.

Como se ha comentado, la reacción de descomposición es una reacción exotérmica, en la que se libera energía en gran cantidad. Esta energía se emplea en generar las ondas de sobrepresión y en la formación de proyectiles. Sin embargo, como el agua oxigenada se encuentra en disolución, puede considerarse el hecho de que parte de esa energía se destine a calentar y vaporizar el agua de la disolución.

Como el modelo de cálculo no permite considerar pérdidas de energía en calentamiento y vaporización, es necesario realizar un cálculo previo que consiste en:

- ◊ estimación de la energía bruta disponible, suponiendo que no hay pérdidas de energía;
- ◊ estimación de la energía necesaria para el calentamiento y la vaporización del agua de disolución;

- ◊ estimación de la energía neta disponible, obtenida como diferencia de las dos anteriores;
- ◊ estimación de la masa de agua oxigenada, que en caso de explotar liberaría esa cantidad de energía neta, si no hubiese pérdidas de energía.

A esta cantidad de agua oxigenada es lo que se ha denominado masa efectiva.

Una vez conocida la masa efectiva que se ve involucrada en la explosión, es posible conocer los efectos de una explosión química de agua oxigenada.

En el cálculo de las zonas objeto de planificación habrá que tener en cuenta de cuánta energía se dispone exactamente para la explosión. En la tabla L.45, se recogen los valores obtenidos para la hipótesis de una explosión química en un camión cisterna de peróxido de hidrógeno, considerando que el 96% de la energía se utiliza en generar ondas de sobrepresión.

Las zonas objeto de planificación, zona de intervención (Z.I.), de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), vienen definidas como círculos, de radio el indicado en la tabla (en metros), y cuyo centro es el punto donde tiene lugar la explosión.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Camión cisterna	Conc. = 60% M _{efectiva} = 5.913 kg	EXPLOSIÓN QUÍMICA	Sobrepresión	158	290	134

Tabla L.45. Cálculo de zonas objeto de planificación para una explosión química de agua oxigenada.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de las explosiones químicas son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irrecuperables y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos.

	CAMIÓN 25 Tm
Muertes por hemorragia pulmonar	
Radio zona de probabilidad del 99%	32 m
Radio zona de probabilidad del 50%	37 m
Radio zona de probabilidad del 1%	51 m
Rotura de tímpanos	
Radio zona de probabilidad del 99%	37 m
Radio zona de probabilidad del 50%	73 m
Radio zona de probabilidad del 1%	155 m
Daños en estructuras	
Radio zona de total demolición	52 m
Radio zona de daños irreversibles	76 m
Radio zona de daños graves	139 m
Rotura de cristales	
Radio zona de probabilidad del 99%	195 m
Radio zona de probabilidad del 50%	336 m
Radio zona de probabilidad del 1%	521 m

Tabla L.46. Análisis de vulnerabilidad de explosiones químicas de agua oxigenada.

ONU 2031: Ácido nítrico, excepto el ácido nítrico fumante rojo, con más del 70% ácido nítrico

El ácido nítrico, excepto el ácido nítrico fumante rojo, con más del 70% ácido nítrico, con número ONU 2031, está clasificado en el ADR como un líquido corrosivo, dentro de la clase 8, con código de clasificación CO1, es decir, materia corrosiva comburente líquida. Asimismo, el ácido nítrico presenta un carácter tóxico, aunque no se encuentre recogido en su clasificación en el ADR, debido a la emanación de vapores nitrosos.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de ácido nítrico. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.12) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso Iniciador	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	-----------------	---------------

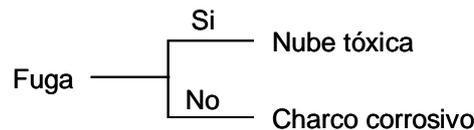


Figura L.12. Árbol de sucesos de una fuga de ácido nítrico

Tomando como suceso iniciador una fuga de ácido nítrico, el líquido que se derramase formaría un charco corrosivo del que, si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se podrá evaporar parte del líquido del charco, formándose una nube tóxica.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de ácido nítrico al 70% de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 25 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de ácido nítrico al 70% que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de ácido nítrico al 70% por una perforación de 2" de diámetro en un camión cisterna.

- ▶ Diámetro del orificio 50,8 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 6,22 kg/s, que formará un charco libre de 37 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,02 kg/s.

- ◊ Fuga de ácido nítrico al 70% por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 54 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,057 kg/s.

Nube tóxica

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a tierra llana, huerta con pocos árboles (0,03 m).

Los alcances obtenidos para las zonas de intervención y alerta para los casos estudiados, se presentan en la tabla L.47. Hay que tener en cuenta al hablar de nubes tóxicas de las dimensiones de éstas, por ello se incluyen en la tabla L.48, las dimensiones de las nubes obtenidas, en función de la máxima anchura de la nube y a qué distancia del punto de fuga se encuentra.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFEECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión cisterna	Fuga = 6,62 kg/s Q _{evap} = 0,02 kg/s Presión atmosférica Temp. ambiente Duración = 30 min	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	37	--	--
		NUBE TÓXICA	Dispersión	61	644	--
Colapso camión cisterna	Masa = 24.000 kg Q _{evap} = 0,057 kg/s Presión atmosférica Temp. ambiente Duración = 30 min	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	54	--	--
		NUBE TÓXICA	Dispersión	132	1413	--

Tabla L.47. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de ácido nítrico al 70%.

	Zona de Intervención		Zona de Alerta	
	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)
Perf. 2" camión cisterna	9	35	75	369
Colapso camión cisterna	18	76	151	813

Tabla L.48. Dimensiones de las nubes tóxicas de fluoruro de ácido nítrico al 70%.

Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad para nubes tóxicas se centra en muertes por inhalación. En la tabla L.49, se presentan los valores para los radios del 99%, del 50% y del 1% de probabilidad de ocurrencia de muertes por inhalación para los estudios de dispersión realizados. Las dimensiones de las nubes se dan en metros.

	PERFORACIÓN 2" CAMIÓN CISTERNA			COLAPSO TOTAL CAMIÓN CISTERNA		
	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.
Muertes por inhalación						
Radio zona de probabilidad 99%	5 m	1 m	4 m	8 m	2 m	7 m
Radio zona de probabilidad 50%	8 m	2 m	7 m	18 m	3 m	10 m
Radio zona de probabilidad del 1%	16 m	3 m	7 m	35 m	6 m	20 m

Tabla L.49. Análisis de vulnerabilidad de las nubes tóxicas de ácido nítrico al 70%.

ONU 2055: Estireno monómero estabilizado

El estireno monómero estabilizado, número de ONU 2055, está clasificado en el ADR como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación F1, es decir, líquidos inflamables con un punto de inflamación inferior o igual a 60°C.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de estireno. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.13) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso iniciador	Bloqueo válvulas	Ignición inmediata	Ignición retardada	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	------------------	--------------------	--------------------	-----------------	---------------

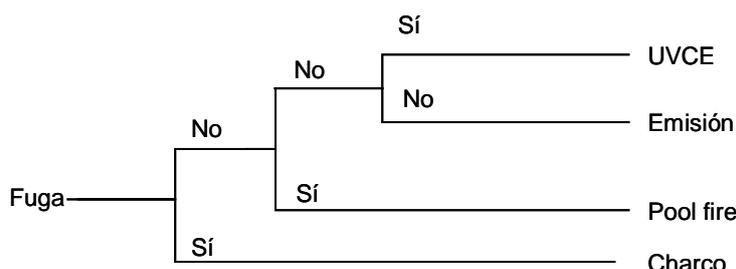


Figura L.13. Árbol de sucesos de una fuga de estireno

Tomando como suceso iniciador una fuga de estireno es decir, el derrame, todo el líquido pasa a formar parte de un charco, que en caso de que encontrase una fuente de ignición, se produciría un incendio del charco formado o *pool fire*. Por otro lado, si el charco no entrase en ignición y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido, formándose una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de estireno de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 25 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de estireno que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de estireno por una perforación de 2" de diámetro de un camión cisterna.
 - ▶ Diámetro del orificio 5,08 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 4,99 kg/s, que formará un charco libre de 40 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,0809 kg/s.

- ◊ Fuga de estireno por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 67 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,41 kg/s.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de estireno, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.50. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de estireno y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar, o, si no la encuentra, dispersarse.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.50. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 4,99 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 0,08 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 40 \text{ m}$	Rad. térmica	41	59	49
		UVCE C.E. = 37 m	Sobrepresión	63	157	49
Colapso camión	Masa = 25.000 kg $Q_{evap} = 0,41 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 67 \text{ m}$	Rad. térmica	44	108	82
		UVCE C.E. = 67 m	Sobrepresión	108	269	84

Tabla L.50. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de estireno.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	21 m	34 m
Radio zona de probabilidad del 50%	28 m	47 m
Radio zona de probabilidad del 1%	43 m	72 m

Tabla L.51. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de estireno estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	4 m	7 m
Radio zona de probabilidad del 50%	6 m	10 m
Radio zona de probabilidad del 1%	8 m	14 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	6 m	10 m
Radio zona de probabilidad del 50%	19 m	32 m
Radio zona de probabilidad del 1%	61 m	104 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	10 m	17 m
Radio zona de daños irreversibles	20 m	34 m
Radio zona de daños graves	53 m	90 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	86 m	148 m
Radio zona de probabilidad del 50%	198 m	341 m
Radio zona de probabilidad del 1%	457 m	789 m

Tabla L.52. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de estireno.

ONU 2304: Naftaleno fundido

El naftaleno fundido, con número ONU 2304, está clasificado en el ADR como una materia sólida inflamable orgánica fundida, clase 4.1, con código de clasificación F2.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de naftaleno. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.14) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso iniciador	Bloqueo válvulas	Ignición inmediata	Ignición retardada	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	------------------	--------------------	--------------------	-----------------	---------------

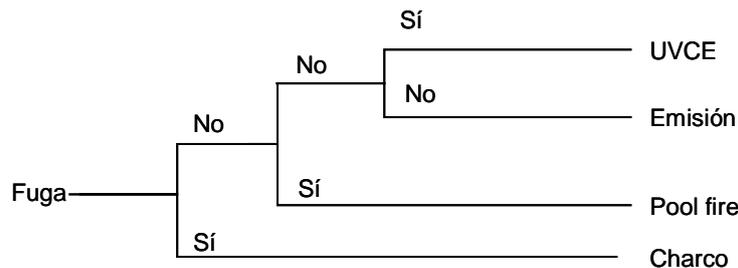


Figura L.14. Árbol de sucesos de una fuga de naftaleno fundido

Tomando como suceso iniciador una fuga de naftaleno fundido es decir, el derrame, todo el líquido pasa a formar parte de un charco, que en caso de que encontrase una fuente de ignición, se produciría un incendio del charco formado o *pool fire*. Por otro lado, si el charco no entrase en ignición y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido, formándose una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada). Si el líquido que forma el charco no entrase en ignición podría alcanzar canalizaciones próximas al lugar de la fuga, dando lugar a una contaminación del medio ambiente acuático, debido a su peligrosidad para el medio ambiente.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un camión cisterna de naftaleno fundido de las siguientes características.

- ▶ Cantidad 25 Tm
- ▶ Longitud 14 m
- ▶ Temperatura 83 °C
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de naftaleno fundido que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de naftaleno fundido por una perforación de 2" de diámetro de un camión cisterna.

- ▶ Diámetro del orificio 5,08 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 4,99 kg/s, que formará un charco libre de 39 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como

consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,072 kg/s.

- ◊ Fuga de naftaleno fundido por colapso total del camión cisterna.

Tras el colapso del camión cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 59 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,31 kg/s.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de naftaleno, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.53. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de naftaleno fundido y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar, o, si no la encuentra, dispersarse.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.53. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 2" camión	$Q_{fuga} = 5,81 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 0,07 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 39 \text{ m}$	Rad. térmica	40	58	48
		UVCE C.E. = 46 m	Sobrepresión	21	53	17
Colapso camión	Masa = 25.000 kg $Q_{evap} = 0,31 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 59 \text{ m}$	Rad. térmica	69	97	74
		UVCE C.E. = 77 m	Sobrepresión	35	86	27

Tabla L.53. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de naftaleno fundido.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	20 m	31 m
Radio zona de probabilidad del 50%	27 m	42 m
Radio zona de probabilidad del 1%	42 m	66 m

Tabla L.54. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de naftaleno fundido estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 2" CAMIÓN	COLAPSO CAMIÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 50%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 1%	3 m	5 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	2 m	3 m
Radio zona de probabilidad del 50%	7 m	10 m
Radio zona de probabilidad del 1%	21 m	34 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	4 m	6 m
Radio zona de daños irreversibles	7 m	11 m
Radio zona de daños graves	18 m	29 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	29 m	48 m
Radio zona de probabilidad del 50%	67 m	109 m
Radio zona de probabilidad del 1%	153 m	251 m

Tabla L.55. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de naftaleno fundido.

4. Análisis de consecuencias en el transporte de mercancías peligrosas por ferrocarril en La Rioja

A continuación se presenta el desarrollo del análisis de consecuencias realizado para las distintas mercancías peligrosas transportadas por ferrocarril en la Comunidad Autónoma de La Rioja.

ONU 1010: Butadienos estabilizados o butadienos e hidrocarburos en mezcla estabilizada

El número ONU 1010 corresponde a butadienos estabilizados o butadienos e hidrocarburos en mezcla estabilizada, teniendo a 70°C una presión de vapor que no exceda de 1,1 MPa y a 50°C una densidad no inferior a 0,525 kg/L (a partir de ahora butadienos). Estos butadienos están clasificados según el RID como gases dentro de la clase 2, con código de clasificación 2F, es decir, gases inflamables. Dentro de este número ONU el producto más comercializado y transportado es el 1,3-butadieno, razón por la que se ha llevado cabo el análisis de consecuencias para este isómero.

El alcance de las consecuencias de un accidente con 1,3-butadieno depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.15) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

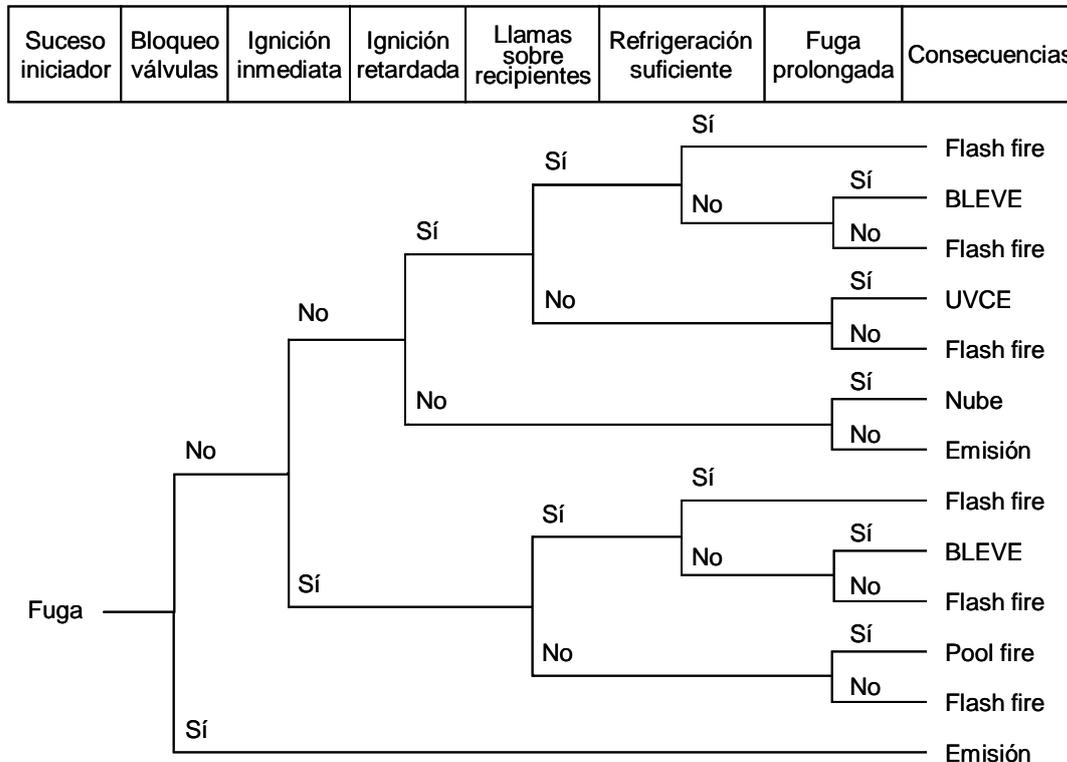


Figura L.15. Árbol de sucesos de una fuga de 1,3-butadieno.

Tomando como suceso iniciador la fuga de 1,3-butadieno líquido, es decir, el derrame, como la temperatura del fluido es muy inferior a la temperatura ambiente, una parte del líquido que escapa pasa a fase gaseosa instantáneamente, sufriendo lo que se denomina evaporación súbita o flash. El resto del líquido formaría un charco que en caso de que entrase en ignición, daría lugar a un incendio del charco o *pool fire*.

En caso negativo, y si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se produciría la evaporación de parte del líquido del charco, debido principalmente al aporte de calor del terreno. Esta cantidad de gas, junto con la evaporada súbitamente, formaría una nube que si encuentra una fuente de ignición podría producir una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

En el supuesto de que la fuga se produzca en la parte del gas del recipiente, se produciría un dardo que en caso de incendiarse formaría un dardo de fuego (*jet fire*).

Por último, como consecuencia de un incendio cerca del recipiente, se podría producir un BLEVE del mismo.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un vagón cisterna de 1,3-butadieno de las siguientes características.

- ▶ Volumen 50 m³
- ▶ Longitud 18 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión saturación

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de 1,3-butadieno que se han planteado en el estudio son:

- ◇ Fuga de 1,3-butadieno líquido por una perforación de 3" de diámetro en la zona de líquido de un vagón cisterna

- ▶ Diámetro del orificio 76,2 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 26,95 kg/s. Una parte del mismo sufrirá una evaporación súbita (2,75 kg/s) y el resto (24,20 kg/s) formará un charco de 79 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia del aporte de calor del terreno (13,50 kg/s).

- ◇ Fuga de 1,3-butadieno gas por una perforación de 3" de diámetro en la zona de gas de un vagón cisterna

- ▶ Diámetro del orificio 76,2 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 1,17 kg/s.

- ◇ Fuga de 1,3-butadieno líquido por colapso total del vagón cisterna

Tras el colapso del vagón cisterna, parte del líquido fugado sufrirá una evaporación súbita (2.967,84 kg) y el resto formará un charco de 90 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia del aporte de calor del terreno (15,82 kg/s).

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a una ciudad con edificios altos o instalaciones industriales con obstáculos elevados (3 metros).

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce una fuga de butadieno, parte se evapora instantáneamente y el resto forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.56. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Dardo de fuego

Al tratarse el butadieno de un gas presurizado, en el supuesto de que la fuga se produzca en la parte del gas del vagón cisterna, se produciría un dardo que en caso de incendiarse formaría un dardo de fuego (*jet fire*).

Para el cálculo de la radiación emitida por un dardo de fuego es necesario conocer dos ángulos:

- ◊ el ángulo entre la dirección del viento y el vector normal al recipiente, en el plano horizontal, y
- ◊ el ángulo entre el eje del agujero y la horizontal.

Se han tomado los valores más desfavorables. El primero de ellos, ocurre cuando el viento sopla perpendicularmente al vagón, es decir, 0° . Y para el segundo, se ha tomado el valor de 90° , tras realizar un estudio en el que se buscaba el ángulo que daba mayores valores de las zonas de objeto de planificación.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), de la zona de alerta (Z.A.) y de la zona del efecto dominó (E.D.) para los estudios analizados se encuentran recogidos en la tabla L.56.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Como se ha comentado anteriormente, cuando hay una fuga de butadieno líquido, una parte sufre una evaporación súbita o *flash* y el resto forma un charco. En caso de no producirse la ignición, parte de este se evapora formando una nube que puede encontrar una fuente de

ignición y explosionar. El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los cálculos que se han realizado están basados en este caso más desfavorable. Los valores obtenidos (en metros) para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.56. Este valor C.E. es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

BLEVE

Se han calculado (tabla L.56) las zonas de intervención, de alerta y del efecto dominó para la radiación térmica y la sobrepresión, así como una estimación del alcance de los proyectiles considerando que el 4% de la energía se utiliza para este fin y el resto para la formación de ondas de presión.

Iniciador	Condiciones de fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 3" vagón	$Q_{fuga} = 26,95 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 13,5 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 79 \text{ m}$	Rad. térmica	182	255	120
		UVCE C.E. = 173 m	Sobrepresión	316	789	247
Perf. 3" zona gas vagón	$Q_{fuga} = 1,17 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	DARDO DE FUEGO $Q_{descarga} = 1,17 \text{ kg/s}$	Rad. térmica	7	18	16
		UVCE C.E. = 64 m	Sobrepresión	136	339	106
Colapso vagón	Masa = 31.458 Tm $Q_{evap} = 15,82 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 90 \text{ m}$	Rad. térmica	205	287	136
		UVCE C.E. = 185 m	Sobrepresión	334	834	261
		BLEVE	Rad. térmica Sobrepresión Proyectiles	421 33 --	596 60 --	527 28 --

Tabla L.56. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de 1,3-butadieno líquido.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó

1% de fallecer por dicha radiación. En las siguientes tablas se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. VAGÓN	COLAPSO VAGÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	44 m	50 m
Radio zona de probabilidad del 50%	67 m	77 m
Radio zona de probabilidad del 1%	106 m	120 m

Tabla L.57. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de 1,3-butadieno líquido estudiados.

	PERF. VAGÓN
Muertes por radiación térmica	
Radio zona de probabilidad del 99%	1 m
Radio zona de probabilidad del 50%	6 m
Radio zona de probabilidad del 1%	12 m

Tabla L.58. Análisis de vulnerabilidad de los incendios tipo dardos de fuego de 1,3-butadieno estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).



	PERF. LIQ. VAGÓN	PERF. GAS VAGÓN	COLAPSO VAGÓN
Muertes por hemorragia pulmonar			
Radio zona de probabilidad del 99%	20 m	9 m	21 m
Radio zona de probabilidad del 50%	28 m	12 m	29 m
Radio zona de probabilidad del 1%	39 m	17 m	41 m
Rotura de tímpanos			
Radio zona de probabilidad del 99%	28 m	12 m	29 m
Radio zona de probabilidad del 50%	92 m	40 m	97 m
Radio zona de probabilidad del 1%	306 m	131 m	323 m
Daños en estructuras			
Radio zona de total demolición	93 m	40 m	98 m
Radio zona de daños irreversibles	206 m	89 m	217 m
Radio zona de daños graves	457 m	196 m	482 m
Rotura de cristales			
Radio zona de probabilidad del 99%	434 m	187 m	459 m
Radio zona de probabilidad del 50%	1.001 m	430 m	1.057 m
Radio zona de probabilidad del 1%	2.306 m	990 m	2.436 m

Tabla L.59. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de 1,3-butadieno líquido.

En el caso de BLEVE, se obtienen consecuencias de la radiación y consecuencias de la sobrepresión.

VAGÓN	
Efectos de la radiación térmica	
Muertes por radiación térmica	
Radio zona de probabilidad del 99%	285 m
Radio zona de probabilidad del 50%	349 m
Radio zona de probabilidad del 1%	447 m
Efectos de la sobrepresión	
Muertes por hemorragia pulmonar	
Radio zona de probabilidad del 99%	7 m
Radio zona de probabilidad del 50%	9 m
Radio zona de probabilidad del 1%	10 m
Rotura de tímpanos	
Radio zona de probabilidad del 99%	9 m
Radio zona de probabilidad del 50%	15 m
Radio zona de probabilidad del 1%	32 m
Daños en estructuras	
Radio zona de total demolición	15 m
Radio zona de daños irreversibles	25 m
Radio zona de daños graves reparables	42 m
Rotura de cristales	
Radio zona de probabilidad del 99%	41 m
Radio zona de probabilidad del 50%	70 m
Radio zona de probabilidad del 1%	108 m

Tabla L.60. Análisis de vulnerabilidad de BLEVEs de 1,3-butadieno líquido.

ONU 1052: Fluoruro de hidrógeno anhidro

El fluoruro de hidrógeno anhidro, con número ONU 1052, está clasificado en el RID, como un líquido corrosivo clase 8, con código de clasificación CT1, es decir, tóxico además de corrosivo.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de fluoruro de hidrógeno. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.16) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

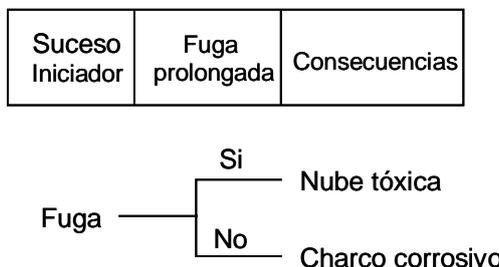


Figura L.16. Árbol de sucesos de una fuga de fluoruro de hidrógeno anhidro.

Tomando como suceso iniciador el derrame de fluoruro de hidrógeno, puede ser que todo el líquido pase a formar parte de un charco, peligroso por el carácter corrosivo del líquido. De este charco, si las condiciones meteorológicas lo favorecen, se podría producir la evaporación de parte del líquido, formándose una nube tóxica.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un vagón cisterna de fluoruro de hidrógeno anhidro de las siguientes características.

- ▶ Volumen 50 m³
- ▶ Longitud 18 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de fluoruro de hidrógeno anhidro que se han planteado en el estudio son:

- ◇ Fuga de fluoruro de hidrógeno anhidro por una perforación de 3" de diámetro en un vagón cisterna

- ▶ Diámetro del orificio 76,2 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 12,3 kg/s, que formará un charco libre de 61 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 5,2 kg/s.

- ◇ Fuga de fluoruro de hidrógeno anhidro por colapso total del vagón cisterna

Tras el colapso del vagón cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 90 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 18,4 kg/s.

Nube tóxica

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a una ciudad con edificios altos o instalaciones industriales con obstáculos elevados (3 metros).

Los alcances obtenidos para las zonas de intervención y alerta para los casos estudiados, se presentan en la tabla L.61. Hay que tener en cuenta al hablar de nubes tóxicas de las dimensiones de éstas, por ello se incluyen en la tabla L.62, las dimensiones de las nubes obtenidas, en función de la máxima anchura de la nube y a qué distancia del punto de fuga se encuentra.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFEECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 3" vagón	$Q_{fuga} = 12,29 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 5,19 \text{ kg/s}$	NUBE TÓXICA	Dispersión	2.834	12.678	--
Colapso vagón cisterna	Masa = 48.364 kg $Q_{evap} = 18,40 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	6.226	14.240	--

Tabla L.61. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de fluoruro de hidrógeno anhidro.

	Zona de Intervención		Zona de Alerta	
	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)
Perf. 3" vagón cisterna	270	1.620	1.751	9.880
Colapso vagón cisterna	579	3.850	2.478	10.750

Tabla L.62. Dimensiones de las nubes tóxicas de fluoruro de hidrógeno anhidro.

Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad para nubes tóxicas se centra en muertes por inhalación. En la tabla L.63, se presentan los valores para los radios del 99%, del 50% y del 1% de probabilidad de ocurrencia de muertes por inhalación para los estudios de dispersión realizados. Las dimensiones de las nubes se dan en metros.

	PERFORACIÓN 3" VAGÓN CISTERNA			COLAPSO TOTAL VAGÓN CISTERNA		
	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.
Muertes por inhalación						
Radio zona de probabilidad 99%	58 m	8 m	40 m	135 m	16 m	100 m
Radio zona de probabilidad 50%	92 m	12 m	60 m	210 m	25 m	100 m
Radio zona de probabilidad del 1%	145 m	18 m	80 m	329 m	39 m	200 m

Tabla L.63. Análisis de vulnerabilidad de las nubes tóxicas de fluoruro de hidrógeno.

ONU 1093: Acrilonitrilo estabilizado

El acrilonitrilo estabilizado, con número ONU 1093, está clasificado en el RID, como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación FT1, es decir, tóxico además de inflamable.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de acrilonitrilo. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.17) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

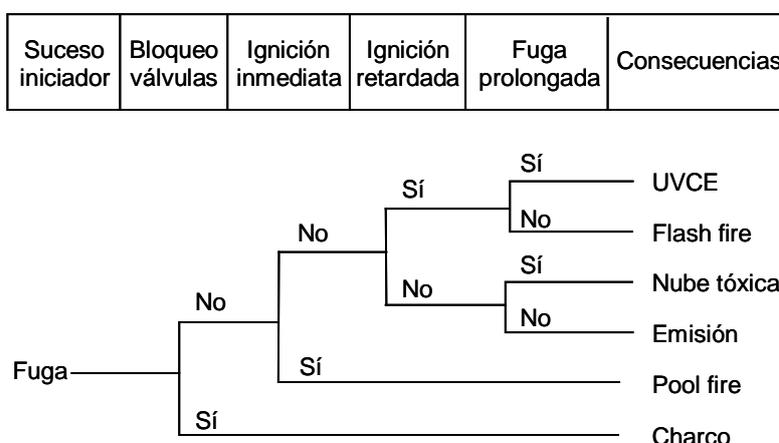


Figura L.17. Árbol de sucesos de una fuga de acrilonitrilo

Tomando como suceso iniciador una fuga de acrilonitrilo, el líquido que se derramase formaría un charco, que podría incendiarse si encontrase alguna fuente de ignición cercana, dando lugar a un incendio de charco o pool fire. En caso contrario, y si las condiciones meteorológicas lo favoreciesen, se podría producir la evaporación de parte del líquido del charco, formándose una nube tóxica, que si encontrase una fuente de ignición daría lugar a una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

Si el líquido que forma el charco no entrase en ignición podría alcanzar canalizaciones próximas al lugar de la fuga, dando lugar a una contaminación del medio ambiente acuático, debido a su peligrosidad para el medio ambiente.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un vagón cisterna de acrilonitrilo de las siguientes características.

- ▶ Volumen 50 m³
- ▶ Longitud 18 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de acrilonitrilo que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de acrilonitrilo por una perforación de 3" de diámetro de un vagón cisterna.
 - ▶ Diámetro del orificio 76,2 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 10,33 kg/s, que formará un charco libre de 61 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 0,98 kg/s.

- ◊ Fuga de acrilonitrilo por colapso total del vagón cisterna

Tras el colapso del vagón cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 90 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 3,9 kg/s.

Nube tóxica

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a una ciudad con edificios altos o instalaciones industriales con obstáculos elevados (3 metros).

Los alcances obtenidos para las zonas de intervención y alerta para los casos estudiados, se presentan en la tabla L.64. Hay que tener en cuenta al hablar de nubes tóxicas de las dimensiones de éstas, por ello se incluyen en la tabla L.65, las dimensiones de las nubes obtenidas, en función de la máxima anchura de la nube y a qué distancia del punto de fuga se encuentra.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de acrilonitrilo, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.64. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Cuando hay un derrame de acrilonitrilo y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar, o, si no la encuentra, dispersarse dando lugar a una nube tóxica.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.64. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 3" vagón	$Q_{fuga} = 10,33 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 0,98 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	491	1.079	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 61 \text{ m}$	Rad. térmica	51	70	58
		UVCE C.E. = 54 m	Sobrepresión	105	261	82
Colapso vagón	Masa = 40.625 kg $Q_{evap} = 3,9 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	1.179	2.573	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 90 \text{ m}$	Rad. térmica	81	109	85
		UVCE C.E. = 94 m	Sobrepresión	165	413	129

Tabla L.64. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de acrilonitrilo estabilizado.

	Zona de Intervención		Zona de Alerta	
	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)
Perf. 3" vagón cisterna	56	280	114	620
Colapso vagón cisterna	124	680	252	1480

Tabla L.65. Dimensiones de las nubes tóxicas de acrilonitrilo estabilizado.

Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad para nubes tóxicas se centra en muertes por inhalación. En la tabla L.66, se presentan los valores para los radios del 99%, del 50% y del 1% de probabilidad de ocurrencia de muertes por inhalación para los estudios de dispersión realizados. Las dimensiones de las nubes se dan en metros.

	PERFORACIÓN 3" VAGÓN CISTERNA			COLAPSO TOTAL VAGÓN CISTERNA		
	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.
Muertes por inhalación						
Radio zona de probabilidad 99%	91 m	12 m	60 m	222 m	27 m	120 m
Radio zona de probabilidad 50%	130 m	17 m	80 m	315 m	37 m	180 m
Radio zona de probabilidad del 1%	184 m	23 m	100 m	446 m	51 m	260 m

Tabla L.66. Análisis de vulnerabilidad de las nubes tóxicas de acrilonitrilo estabilizado.

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 3" VAGÓN	COLAPSO VAGÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	31 m	45 m
Radio zona de probabilidad del 50%	35 m	52 m
Radio zona de probabilidad del 1%	52 m	76 m

Tabla L.67. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de acrilonitrilo estabilizado estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 3" VAGÓN	COLAPSO VAGÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	7 m	10 m
Radio zona de probabilidad del 50%	9 m	15 m
Radio zona de probabilidad del 1%	13 m	21 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	9 m	15 m
Radio zona de probabilidad del 50%	31 m	48 m
Radio zona de probabilidad del 1%	101 m	160 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	31 m	49 m
Radio zona de daños irreversibles	68 m	108 m
Radio zona de daños graves	151 m	239 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	144 m	227 m
Radio zona de probabilidad del 50%	330 m	523 m
Radio zona de probabilidad del 1%	761 m	1.205 m

Tabla L.68. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de acrilonitrilo estabilizado.

Análisis de vulnerabilidad del medio ambiente

El acrilonitrilo es una materia clasificada como peligrosa para el medio ambiente según el Real Decreto 363/1995 y sus posteriores modificaciones. Concretamente se clasifica como “tóxica para los organismos acuáticos” y que “puede provocar a largo plazo efectos negativos para el medio ambiente acuático”.

Así pues, si se produce un derrame de acrilonitrilo sin un incendio posterior, hay que tener en cuenta que el charco formado puede contaminar las zonas próximas al lugar del accidente, existiendo la posibilidad de que el líquido alcance canalizaciones de desagüe.

ONU 1131: Disulfuro de carbono

El disulfuro de carbono, con número ONU 1131, está clasificado en el RID, como un líquido inflamable clase 3, con código de clasificación FT1, es decir, tóxico además de inflamable.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de disulfuro de carbono. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.18) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

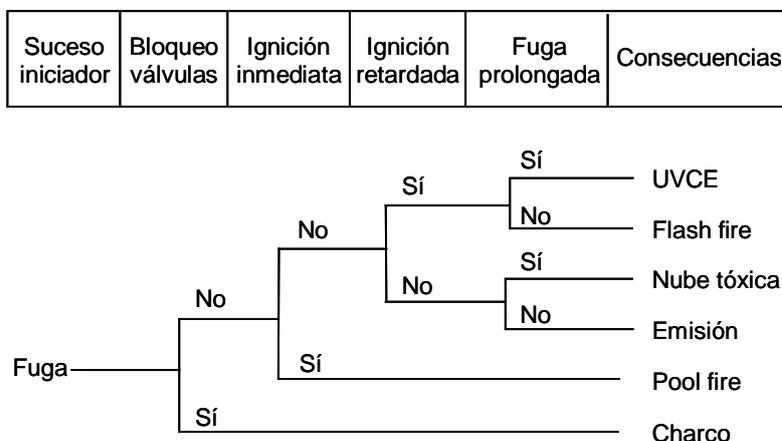


Figura L.18. Árbol de sucesos de una fuga de disulfuro de carbono

Tomando como suceso iniciador una fuga de disulfuro de carbono, el líquido que se derramase formaría un charco, que podría incendiarse si encontrase alguna fuente de ignición cercana, dando lugar a un incendio de charco o pool fire. En caso contrario, y si las condiciones meteorológicas lo favoreciesen, se podría producir la evaporación de parte del líquido del charco, formándose una nube tóxica, que si encontrase una fuente de ignición daría lugar a una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un vagón cisterna de disulfuro de carbono de las siguientes características.

- ▶ Volumen 50 m³
- ▶ Longitud 18 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de disulfuro de carbono que se han planteado en el estudio son:

- ◇ Fuga de disulfuro de carbono por una perforación de 3" de diámetro en un vagón cisterna
 - ▶ Diámetro del orificio 76,2 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 16,12 kg/s, que formará un charco libre de 61 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 4,8 kg/s.

- ◇ Fuga de disulfuro de carbono por colapso total del vagón cisterna

Tras el colapso del vagón cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 90 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores a una velocidad de 18,1 kg/s.

Nube tóxica

La dispersión de las nubes formadas tras las diferentes fugas, se ha calculado para unas condiciones meteorológicas medias siendo los valores correspondientes a éstas:

Velocidad del viento	3,36 m/s
Dirección del viento	WNW
Categoría de estabilidad	D (neutra)
Temperatura media	13,6 °C
Humedad relativa	68%

Además de datos relacionados con la meteorología, se necesita la rugosidad del suelo, para el que se ha tomado el valor correspondiente a una ciudad con edificios altos o instalaciones industriales con obstáculos elevados (3 metros).

Los alcances obtenidos para las zonas de intervención y alerta para los casos estudiados, se presentan en la tabla L.69. Hay que tener en cuenta al hablar de nubes tóxicas de las dimensiones de éstas, por ello se incluyen en la tabla L.70, las dimensiones de las nubes obtenidas, en función de la máxima anchura de la nube y a qué distancia del punto de fuga se encuentra.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de disulfuro de carbono, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.69. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Explosión de nube de vapor no confinada (UVCE)

Quando hay un derrame de disulfuro de carbono y no se produce una ignición inmediata, se va evaporando debido a la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores, formando una nube que puede encontrar una fuente de ignición y explotar, o, si no la encuentra, simplemente dispersarse dando lugar a una nube tóxica.

El caso más desfavorable consistiría en que encontrase la fuente de ignición cuando se concentra más cantidad de la sustancia entre los límites de explosividad y éste es, precisamente, el punto que se ha considerado como centro de la explosión.

Los valores obtenidos para la zona de intervención (Z.I.), la zona de alerta (Z.A.), la zona del efecto dominó (E.D.) y la distancia entre el punto de fuga y el punto donde tendría lugar la explosión (C.E.) para los diferentes derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.69. Este valor C.E., es la distancia entre el punto de fuga y el centro de la explosión en la dirección del viento.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 3" vagón cisterna	$Q_{fuga} = 16,12 \text{ kg/s}$ $Q_{evap} = 4,83 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	359	3.691	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 61 \text{ m}$	Rad. térmica	38	53	45
		UVCE C.E. = 58 m	Sobrepresión	43	107	34
Colapso vagón cisterna	Masa = 63.395 kg $Q_{evap} = 18,08 \text{ kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	836	8.280	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{charco} = 90 \text{ m}$	Rad. térmica	60	82	66
		UVCE C.E. = 99 m	Sobrepresión	66	165	52

Tabla L.69. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de disulfuro de carbono.

	Zona de Intervención		Zona de Alerta	
	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)	ANCHURA MÁXIMA (M)	DISTANCIA (M)
Perf. 3" vagón cisterna	42	210	352	2.130
Colapso vagón cisterna	90	480	754	4.980

Tabla L.70. Dimensiones de las nubes tóxicas de disulfuro de carbono.

Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad para nubes tóxicas se centra en muertes por inhalación. En la tabla L.71, se presentan los valores para los radios del 99%, del 50% y del 1% de probabilidad de ocurrencia de muertes por inhalación para los estudios de dispersión realizados. Las dimensiones de las nubes se dan en metros.

	PERFORACIÓN 3" VAGÓN CISTERNA			COLAPSO TOTAL VAGÓN CISTERNA		
	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.	ALCANCE	ANCHURA MÁXIMA	DISTANC.
Muertes por inhalación						
Radio zona de probabilidad 99%	24 m	4 m	10 m	56 m	7 m	40 m
Radio zona de probabilidad 50%	34 m	5 m	20 m	80 m	11 m	40 m
Radio zona de probabilidad del 1%	49 m	7 m	30 m	116 m	15 m	60 m

Tabla L.71. Análisis de vulnerabilidad de las nubes tóxicas de disulfuro de carbono.

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 3" VAGÓN	COLAPSO VAGÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	31 m	45 m
Radio zona de probabilidad del 50%	31 m	46 m
Radio zona de probabilidad del 1%	40 m	59 m

Tabla L.72. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de disulfuro de carbono estudiados.

Las consecuencias de las explosiones de vapor no confinadas (UVCE) son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irreversibles y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos. Hay que tener en cuenta que en este caso, los círculos correspondientes a las diferentes zonas tienen su centro en el punto donde se ha considerado que tiene lugar la explosión, es decir a una distancia del punto de fuga que viene dada por lo que se ha denominado centro de explosión (C.E.).

	PERF. 3" VAGÓN	COLAPSO VAGÓN
Muertes por hemorragia pulmonar		
Radio zona de probabilidad del 99%	3 m	4 m
Radio zona de probabilidad del 50%	4 m	6 m
Radio zona de probabilidad del 1%	6 m	9 m
Rotura de tímpanos		
Radio zona de probabilidad del 99%	4 m	6 m
Radio zona de probabilidad del 50%	13 m	20 m
Radio zona de probabilidad del 1%	42 m	64 m
Daños en estructuras		
Radio zona de total demolición	13 m	20 m
Radio zona de daños irreversibles	28 m	43 m
Radio zona de daños graves	62 m	95 m
Rotura de cristales		
Radio zona de probabilidad del 99%	59 m	91 m
Radio zona de probabilidad del 50%	135 m	209 m
Radio zona de probabilidad del 1%	310 m	481 m

Tabla L.73. Análisis de vulnerabilidad de explosiones de nubes de vapor no confinadas de disulfuro de carbono.

ONU 1547: Anilina

La anilina, con número ONU 1547, está clasificada en el RID como un líquido tóxico, dentro de la clase 6.1, con código de clasificación T1, es decir, líquido orgánico tóxico. Asimismo, la anilina presenta carácter inflamable, aunque no se encuentre recogido en su clasificación en el RID, con un punto de inflamación de 70°C.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce la fuga de anilina. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.19) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

Suceso iniciador	Bloqueo válvulas	Ignición inmediata	Ignición retardada	Fuga prolongada	Consecuencias
------------------	------------------	--------------------	--------------------	-----------------	---------------

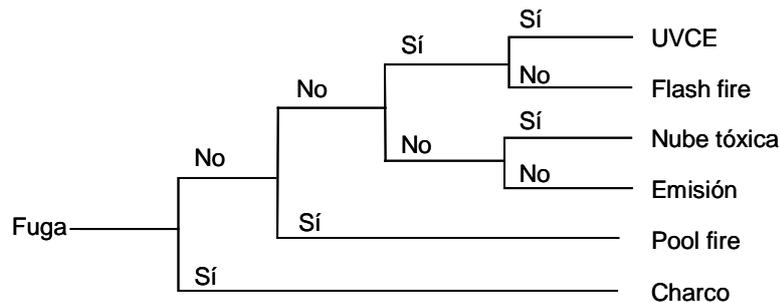


Figura L.19. Árbol de sucesos de una fuga de anilina

Tomando como suceso iniciador una fuga de anilina, el líquido que se derramase formaría un charco, que podría incendiarse si encontrase alguna fuente de ignición cercana, dando lugar a un incendio de charco o pool fire. En caso contrario, y si las condiciones meteorológicas lo favoreciesen, se podría producir la evaporación de parte del líquido del charco, formándose una nube tóxica, que si encontrase una fuente de ignición daría lugar a una UVCE (explosión de una nube de vapor no confinada).

Si el líquido que forma el charco no entrase en ignición podría alcanzar canalizaciones próximas al lugar de la fuga, dando lugar a una contaminación del medio ambiente acuático, debido a su peligrosidad para el medio ambiente.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un vagón cisterna de anilina de las siguientes características.

- ▶ Volumen 50 m³
- ▶ Longitud 18 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de anilina que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de anilina por una perforación de 3" de diámetro en un vagón cisterna

- ▶ Diámetro del orificio 76,2 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 12,99 kg/s, que formará un charco libre de 61 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del

charco formado y la que existe en los alrededores. Sin embargo, y dado que la presión de vapor de la anilina es muy baja, en las condiciones meteorológicas para las que se ha realizado el estudio no llegaría a formarse una nube.

◇ Fuga de anilina por colapso total del vagón cisterna

Tras el colapso del vagón cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 90 metros de diámetro, del cual se irá evaporando como consecuencia de la diferencia entre la presión de vapor sobre la superficie del charco formado y la que existe en los alrededores. Al igual que el caso anterior, para las condiciones meteorológicas estudiadas no llegaría a formarse una nube.

Incendio de charco

Como se ha indicado anteriormente, cuando se produce un derrame de anilina, se forma un charco, cuyas dimensiones varían según la cantidad fugada. El líquido se derrama libremente, considerándose un espesor de 8 mm. Si se incendia, se producen unas llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El efecto pernicioso de estos accidentes es, fundamentalmente, la radiación térmica generada.

Los valores obtenidos (en metros) de la zona de intervención (Z.I.), zona de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), y las dimensiones del charco (ϕ_{charco}) para los derrames estudiados, se encuentran recogidos en la tabla L.74. Estas zonas vienen definidas como círculos cuyo centro es el punto de la fuga.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Perf. 3" vagón cisterna	$Q_{\text{fuga}} = 12,99 \text{ kg/s}$ $Q_{\text{evap}} = \text{-- kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	--	--	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{\text{charco}} = 61 \text{ m}$	Rad. térmica	55	76	63
		UVCE C.E. = -- m	Sobrepresión	--	--	--
Colapso vagón cisterna	Masa = 51.100 kg $Q_{\text{evap}} = \text{-- kg/s}$ Duración = 30 min	NUBE TÓXICA	Dispersión	--	--	--
		INCENDIO CHARCO $\phi_{\text{charco}} = 90 \text{ m}$	Rad. térmica	88	119	92
		UVCE C.E. = -- m	Sobrepresión	--	--	--

Tabla L.74. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de anilina.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de incendios, se reducen a las probabilidades de muerte por exposición a la radiación a una determinada distancia y representa la distancia a la que una persona expuesta a la radiación procedente del incendio tiene una probabilidad del 99%, 50% ó 1% de fallecer por dicha radiación. En la siguiente tabla se recogen los valores obtenidos para los incendios estudiados.

	PERF. 3" VAGÓN	COLAPSO VAGÓN
Muertes por radiación térmica		
Radio zona de probabilidad del 99%	31 m	45 m
Radio zona de probabilidad del 50%	37 m	55 m
Radio zona de probabilidad del 1%	56 m	82 m

Tabla L.75. Análisis de vulnerabilidad de los incendios de charco de anilina estudiados.

Análisis de vulnerabilidad del medio ambiente

La anilina es una materia clasificada como peligrosa para el medio ambiente según el Real Decreto 363/1995 y sus posteriores modificaciones. Concretamente se clasifica como “muy tóxica para los organismos acuáticos”.

Así pues, si se produce un derrame de anilina sin un incendio posterior, hay que tener en cuenta que el charco formado puede contaminar las zonas próximas al lugar del accidente, existiendo la posibilidad de que el líquido alcance canalizaciones de desagüe.

ONU 1824: Hidróxido sódico en solución

El hidróxido sódico en solución, con número ONU 1830, está clasificado en el RID como un líquido corrosivo clase 8, con código de clasificación C5, es decir, materia líquida corrosiva de carácter básico.

Tomando como suceso iniciador el derrame de hidróxido sódico, todo el líquido que se derrame formará un charco altamente corrosivo.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un vagón cisterna de hidróxido sódico, al 50%, de las siguientes características.

- ▶ Volumen 50 m³
- ▶ Longitud 18 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de hidróxido sódico en solución que se han planteado en el estudio son:

- ◇ Fuga de una disolución de hidróxido sódico al 50% por una perforación de 3" de diámetro en un vagón cisterna

- ▶ Diámetro del orificio 76,2 mm
- ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 19,39 kg/s, que formará un charco libre de 61 metros de diámetro.

- ◇ Fuga de una disolución de hidróxido sódico al 50% por colapso total del vagón cisterna

Tras el colapso del vagón cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 90 metros de diámetro.

Los resultados obtenidos del cálculo de consecuencias se resumen en la siguiente tabla:

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFEECTO CALCULADO	Z.I. (m)
Perf. 3" vagón	Presión atmosférica Temp. ambiente Fuga = 19,39 kg/s Duración = 30 min	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	61
Colapso vagón	Presión atmosférica Temp. ambiente Cantidad = 76.265 kg	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	90

Tabla L.76. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de una disolución de hidróxido sódico al 50%.

La zona de intervención está definida como un círculo de un radio igual al indicado en la tabla anterior, en metros, y cuyo centro es el punto de fuga.

ONU 1830: Ácido sulfúrico conteniendo más del 51% de ácido

El ácido sulfúrico, con número ONU 1830, está clasificado en el RID como un líquido corrosivo clase 8, con código de clasificación C1, es decir, materia líquida corrosiva de carácter ácido.

Tomando como suceso iniciador el derrame de ácido sulfúrico, todo el líquido que se derrame formará un charco altamente corrosivo.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un vagón cisterna de ácido sulfúrico con más del 51% de ácido de las siguientes características.

- ▶ Volumen 50 m³
- ▶ Longitud 18 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Las hipotéticas fugas de ácido sulfúrico con más del 51% de ácido que se han planteado en el estudio son:

- ◊ Fuga de ácido sulfúrico por una perforación de 3" de diámetro en un vagón cisterna
 - ▶ Diámetro del orificio 76,2 mm
 - ▶ Duración de la fuga 30 minutos

Con estos valores, se obtiene un caudal total de fuga de 23,31 kg/s, que formará un charco libre de 61 metros de diámetro.

- ◊ Fuga de ácido sulfúrico por colapso total del vagón cisterna

Tras el colapso del vagón cisterna, el líquido fugado formará un charco libre de 90 metros de diámetro.

Los resultados obtenidos del cálculo de consecuencias se resumen en la siguiente tabla:

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)
Perf. 3" vagón	Presión atmosférica Temp. ambiente Fuga = 23,31 kg/s Duración = 30 min	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	61
Colapso vagón	Presión atmosférica Temp. ambiente Cantidad = 91.700 kg	FORMACIÓN CHARCO	Extensión del charco	90

Tabla L.77. Cálculo de zonas objeto de planificación para derrames de ácido sulfúrico con más del 51% de ácido.

La zona de intervención está definida como un círculo de un radio igual al indicado en la tabla anterior, en metros, y cuyo centro es el punto de fuga.

ONU 2015: Peróxido de hidrógeno

El peróxido de hidrógeno en solución acuosa estabilizada con más de un 70% de peróxido de hidrógeno, con número ONU 2015, está clasificado en el RID, como una materia comburente clase 5.1, con código de clasificación OC1, es decir, comburente y corrosivo.

El alcance de las consecuencias depende de la evolución de los sucesos desde que se produce una reacción de autodescomposición de agua oxigenada. Esto se ha resumido en el árbol de sucesos adjunto (figura L.20) en el que se indican, en la fila superior, las distintas situaciones que se pueden presentar y en las columnas su evolución si se produce (SÍ) o no se produce (NO) la situación.

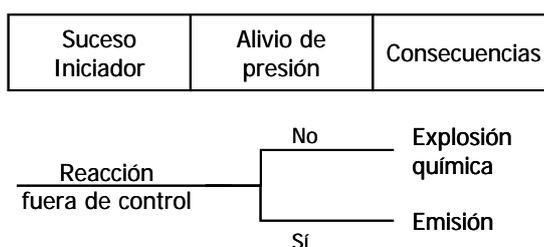


Figura L.20. Árbol de sucesos de una reacción fuera de control de agua oxigenada.

Durante el proceso de transporte, el peróxido de hidrógeno, también denominado agua oxigenada, puede sufrir por efecto del calor o de la presencia de impurezas o por efecto de la temperatura, un proceso de autodescomposición en el que se libera gran cantidad de energía, y que puede acabar en una explosión. Como la energía procede de una reacción química exotérmica, la explosión será química.

Las fugas consideradas en el análisis de consecuencias corresponden a un vagón cisterna de peróxido de hidrógeno con las siguientes características.

- ▶ Volumen 50 m³
- ▶ Longitud 18 m
- ▶ Temperatura ambiente
- ▶ Presión atmosférica

Cálculo de las zonas objeto de planificación

Con el peróxido de hidrógeno el suceso iniciador no es la rotura y consiguiente fuga de agua oxigenada, sino cualquier incidente que suponga un calentamiento del contenido del recipiente y que inicie la descomposición, ocasionando la explosión química.

Como se ha comentado, la reacción de descomposición es una reacción exotérmica, en la que se libera energía en gran cantidad. Esta energía se emplea en generar las ondas de sobrepresión y en la formación de proyectiles. Sin embargo, como el agua oxigenada se encuentra en disolución, puede considerarse el hecho de que parte de esa energía se destine a calentar y vaporizar el agua de la disolución.

Como el modelo de cálculo no permite considerar pérdidas de energía en calentamiento y vaporización, es necesario realizar un cálculo previo que consiste en:

- ◊ estimación de la energía bruta disponible, suponiendo que no hay pérdidas de energía;
- ◊ estimación de la energía necesaria para el calentamiento y la vaporización del agua de disolución;
- ◊ estimación de la energía neta disponible, obtenida como diferencia de las dos anteriores;
- ◊ estimación de la masa de agua oxigenada, que en caso de explotar liberaría esa cantidad de energía neta, si no hubiese pérdidas de energía.

A esta cantidad de agua oxigenada es lo que se ha denominado masa efectiva.

Una vez conocida la masa efectiva que se ve involucrada en la explosión, es posible conocer los efectos de una explosión química de agua oxigenada.

En el cálculo de las zonas objeto de planificación habrá que tener en cuenta de cuánta energía se dispone exactamente para la explosión. En la tabla L.78, se recogen los valores obtenidos para la hipótesis de una explosión química en un vagón cisterna de peróxido de hidrógeno, considerando que el 96% de la energía se utiliza en generar ondas de sobrepresión.

Las zonas objeto de planificación, zona de intervención (Z.I.), de alerta (Z.A.) y zona del efecto dominó (E.D.), vienen definidas como círculos, de radio el indicado en la tabla (en metros), y cuyo centro es el punto donde tiene lugar la explosión.

Iniciador	Condiciones de la fuga	ACCIDENTE	EFECTO CALCULADO	Z.I. (m)	Z.A. (m)	E.D. (m)
Vagón cisterna	Conc. = 70% M _{efectiva} = 38.917 kg	EXPLOSIÓN QUÍMICA	Sobrepresión	295	543	250

Tabla L.78. Cálculo de zonas objeto de planificación para una explosión química de agua oxigenada.

Análisis de vulnerabilidad

Las consecuencias de las explosiones químicas son las derivadas de las sobrepresiones: muerte por hemorragia pulmonar, rotura de tímpanos, daños en estructuras y

rotura de cristales. En la siguiente tabla, se recogen los radios (en metros) de las zonas de total demolición, daños irrecuperables y daños graves reparables para el efecto de daños en estructuras y los radios de las zonas en las que existe una probabilidad del 99%, 50% y 1% de que ocurran el resto de los efectos.

	VAGÓN 50 M³
Muertes por hemorragia	
Radio zona de probabilidad del 99%	63 m
Radio zona de probabilidad del 50%	73 m
Radio zona de probabilidad del 1%	86 m
Rotura de tímpanos	
Radio zona de probabilidad del 99%	73 m
Radio zona de probabilidad del 50%	135 m
Radio zona de probabilidad del 1%	288 m
Daños en estructuras	
Radio zona de total demolición	136 m
Radio zona de daños irreversibles	222 m
Radio zona de daños graves	378 m
Rotura de cristales	
Radio zona de probabilidad del 99%	366 m
Radio zona de probabilidad del 50%	629 m
Radio zona de probabilidad del	977 m

Tabla L.79. Análisis de vulnerabilidad de explosiones químicas de agua oxigenada.