

## **ANEXO D**

### **METODOLOGÍAS**



## Índice

1.- Introducción .....	1
2.- Identificación del riesgo .....	1
2.1.- Métodos de identificación de riesgos.....	1
2.2.- CARBURO DEL CINCA .....	4
2.3.- INQUIDE .....	4
2.4.- QUÍMICA DEL CINCA.....	4
2.5.- LINDE GAS ESPAÑA .....	4
2.6.- ENERGYWORKS MONZÓN.....	5
2.7.- ERCROS .....	5
2.8.- POLIDUX .....	5
3.- Metodología para definir las zonas objeto de planificación.....	6
3.1.- Consideraciones generales.....	6
3.2.- Fugas y evaporaciones .....	7
3.3.- Dispersión de una nube tóxica .....	11
3.4.- Explosión de nubes de vapor no confinadas, UVCE .....	13
3.5.- Incendio de charco.....	14
3.6.- Dardo de fuego .....	16
3.7.- Metodología Probit .....	17
4.- Análisis de vulnerabilidad del Medio Ambiente .....	19
4.1.- Índice Global de Consecuencias Medioambientales (IGCM).....	19
4.2.- Probabilidad de ocurrencia del escenario accidental.....	23
4.3.- Índice de Riesgo Medioambiental .....	24
5.- Análisis del efecto dominó .....	25
6.- Metodología para la evaluación del riesgo en el transporte de mercancías peligrosas .....	27
6.1.- Índice de frecuencia, $I_f$ .....	28
6.2.- Índice de riesgo de la infraestructura, IRI .....	28
6.3.- Índice de riesgo de accidentes, $I_1$ .....	29

6.4.- Índice de impacto, $I_2$ .....	29
6.5.- Índice de riesgo conjunto, IRC .....	30
7.- Metodología para la definición de los índices de peligrosidad .....	31
7.1.- Criterios particulares para la clasificación .....	31
7.2.- Sistemas de clasificación .....	32
7.3.- Consideraciones y condiciones de clasificación.....	38

## 1.- INTRODUCCIÓN

En este anexo se describe la metodología utilizada para la identificación de riesgos en los establecimientos cubiertos por este Plan de Emergencia Exterior, así como la metodología necesaria para llevar a cabo el posterior análisis de consecuencias de los riesgos identificados.

## 2.- IDENTIFICACIÓN DEL RIESGO

Existen diferentes procedimientos para identificar riesgos en una instalación. La elección de una u otra puede depender del grado de experiencia histórica/ingenieril que se tenga del proceso y del nivel al que se quiere identificar el riesgo.

Por un lado, si la instalación la componen múltiples procesos con un volumen importante de unidades y/o productos puede recurrirse a la identificación de áreas de riesgo mediante la aplicación de índices de riesgo (Dow, Mond). Por otro lado, si el proceso es conocido, la identificación puede realizarse por experiencia histórica o por listas de chequeo. Por último, si el proceso es nuevo o tiene particularidades que no permiten una generalización, habría que aplicar métodos de análisis, siempre cualitativos, que sistematicen la búsqueda como: análisis de operabilidad (AFO/HAZOP), análisis "What if?", análisis de los modos de fallo y efectos (FMEA)...

A continuación, se presenta una breve descripción de los métodos de identificación de riesgos más comunes. Posteriormente se describen los diferentes procedimientos para identificar los riesgos que han empleado en cada uno de los establecimientos incluidos dentro de este Plan de Emergencia Exterior.

### **2.1.- Métodos de identificación de riesgos**

#### **Análisis histórico de accidentes**

Esta metodología consiste en estudiar los accidentes registrados en el pasado en plantas similares o en instalaciones que tratan con las mismas sustancias. El aprovechamiento de esta experiencia histórica, permite extraer algunas conclusiones que pueden ser fundamentales para el desarrollo o mejora de una política de seguridad.

La ventaja de esta técnica radica en que se refiere a accidentes ya ocurridos, por lo que los peligros identificados con su uso son indudablemente reales. Por otro lado, ahí reside también su principal limitación, ya que el análisis sólo se refiere a accidentes que han tenido lugar y de los cuales se posee información. El número de casos a analizar es, por tanto, finito y no cubre todas las posibilidades importantes. Además, hay que tener en cuenta, que la información disponible sobre un accidente es limitada.

Existen en el mercado numerosas bases de datos que contienen una recopilación de accidentes graves ocurridos en la historia en el que se han visto involucradas sustancias peligrosas. Algunas de las más conocidas son las bases de datos FACTS, MHIDAS y MARS.

La base de datos FACTS (*Failure and Accidents Technical information System*) incluye más de 16.000 accidentes y permite una amplia variedad de respuestas a preguntas relativas al manejo de productos peligrosos.

MHIDAS (*Major Hazard Incident Data Service*) es una base de datos de accidentes graves desarrollada por AEA Technology plc por parte de la Unidad de Evaluación de Accidentes Graves del Servicio de Seguridad y Salud del Reino Unido. Este sistema se ha creado para recopilar los detalles de los accidentes con sustancias peligrosas que producen, o potencialmente pueden producir, un impacto importante sobre la población. Contiene incidentes de unos 95 países en todo el mundo y particularmente de los Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Alemania, Francia e India.

La base de datos MARS (*Major Accident Reporting System*) es una base de datos de accidentes recopilados por la Unión Europea a través del Joint Research Centre de la Comisión Europea. Se trata de una base de datos accesible a través de la web y que en la actualidad recoge más de 500 accidentes graves ocurridos en la Unión Europea desde 1.979 hasta el día de hoy.

Además de bases de datos generales, en las que se recogen accidentes con diferentes sustancias químicas y en distintos tipos de instalaciones, existen otras más específicas como GEST (EUROCHLOR) que contiene información técnica e histórica sobre accidentes y manipulación de cloro.

## **Análisis funcional de operabilidad (HAZOP)**

Es una técnica deductiva ampliamente reconocida para la identificación de riesgos y problemas de operacionales, derivados del funcionamiento incorrecto de un sistema o proceso técnico.

La sistemática consiste en la aplicación de unas "palabras guía" a las diferentes variables o actividades que caracterizan el proceso a evaluar, con el objeto de generar desviaciones, es decir, circunstancias en las cuales la intención de diseño (propósito que cumple en condiciones normales de operación) no se cumple, que conducen a identificar las posibles causas, así como a determinar las consecuencias previsibles.

Durante el análisis se tienen en cuenta las salvaguardias instaladas o que se tienen previsto instalar, de forma que los eventos peligrosos se presentarían cuando tales salvaguardias sean insuficientes o no actúen como está previsto.

Las ventajas del método son el carácter sistemático del análisis (la aplicación de las palabras guía tiene por objeto proporcionar una estructura de razonamiento) y su naturaleza multidisciplinar (es aplicado por un equipo formado por personas de distinta procedencia).

## **Riesgos asociados a los productos y riesgos asociados a los procesos: Análisis preliminar de riesgos**

El análisis preliminar de riesgos (APR) selecciona los productos peligrosos y los equipos principales de la planta y se puede considerar como una revisión sistemática de aquellos puntos en los que puede liberarse energía de forma incontrolada.

Fundamentalmente, consiste en formular una lista de estos puntos con los peligros ligados a:

- ◆ Materias primas, productos intermedios o finales y su reactividad
- ◆ Equipos de planta
- ◆ Límites entre componentes de los sistemas
- ◆ Entorno de los procesos
- ◆ Operaciones: pruebas, mantenimiento, paradas, puesta en marcha
- ◆ Instalaciones
- ◆ Equipos de seguridad

Los resultados del análisis incluyen recomendaciones para reducir o eliminar estos peligros, siempre de forma cualitativa.

Requiere para su realización de un equipo relativamente pequeño, de 2 ó 3 personas con experiencia en seguridad, códigos de diseño, especificaciones de equipos y materiales, por lo que es adecuado para examinar los proyectos de modificaciones o plantas nuevas en una etapa inicial.

El objetivo principal del APR es identificar los peligros, los sucesos iniciadores y otros sucesos que provoquen consecuencias indeseables. Pueden identificarse, asimismo, criterios de diseño o alternativas que contribuyan a eliminar o reducir estos peligros o riesgos.

Deben considerarse los siguientes puntos:

- ◆ Sustancias y materias peligrosas (combustibles, sustancias altamente reactivas, tóxicas, sustancias comburentes...) y sus características físicas, químicas y toxicológicas.
- ◆ Interrelaciones peligrosas entre equipos y sustancias (iniciación y propagación de fuegos y explosiones, sistemas de control y paro, condiciones de trabajo extremas).
- ◆ Factores ambientales (vibraciones, humedad, temperaturas externas, descargas eléctricas).
- ◆ Procedimientos de operación, pruebas, mantenimiento y emergencias (errores humanos, distribución de equipos, accesibilidad, protección personal).
- ◆ Instalaciones (almacenamientos, equipos de pruebas, formación).

- ♦ Equipos de seguridad (sistemas de protección, redundancias, sistemas contra incendios, equipos de protección personal).

## **2.2.- CARBURO DEL CINCA**

De acuerdo a la información aportada por la empresa, la identificación del riesgo en el establecimiento se ha basado en:

- ♦ Estudio exhaustivo de la instalación, teniendo en cuenta las condiciones de operación, diseño de los equipos y áreas de la instalación en los que se ven involucrados productos con características de peligrosidad, así como las condiciones de manipulación y almacenamiento de dichos productos.
- ♦ Análisis de las propiedades peligrosas de las sustancias peligrosas.
- ♦ Análisis histórico de accidentes en instalaciones similares y para las mismas sustancias peligrosas.
- ♦ Criterio general de selección de escenarios, apoyado en datos de fallo genéricos de establecimientos similares.

## **2.3.- INQUIDE**

De todas estas metodologías existentes para identificar los posibles riesgos, el Informe de Seguridad presentado por la empresa INQUIDE se ha basado en lo siguiente:

- ♦ Análisis de la peligrosidad intrínseca de las sustancias presentes en la planta, basado en las propiedades físicas, químicas y toxicológicas de las mismas.
- ♦ La experiencia de TEMA S.A. en la realización de estudios en plantas similares.

## **2.4.- QUÍMICA DEL CINCA**

De acuerdo a la información aportada por la empresa, para la identificación del riesgo en las instalaciones de QUÍMICA DEL CINCA, se ha recurrido a los siguientes métodos de identificación:

- ♦ Análisis HAZOP de las unidades y equipos que vehiculan o manipulan cloro.
- ♦ Análisis histórico de accidentes.

## **2.5.- LINDE GAS ESPAÑA**

De acuerdo con el Plan de Autoprotección de la empresa, la identificación del riesgo se ha llevado a cabo mediante los dos métodos siguientes:

- ◊ Análisis histórico.
- ◊ Análisis de la peligrosidad intrínseca de las sustancias.

## **2.6.- ENERGYWORKS MONZÓN**

De acuerdo con el Plan de Autoprotección de la empresa, la identificación de riesgos se ha llevado a cabo desarrollando una ficha para cada planta o zona que comprende los siguientes puntos:

- ◊ Productos que pueden verse implicados, cantidades máximas y características.
- ◊ Medios de protección contra incendios.
- ◊ Medios de contención.
- ◊ Vías de evacuación o acceso.
- ◊ Carga de fuego.
- ◊ Observaciones a tener en cuenta.

Además, puesto que la división de las zonas es estimativa y no garantiza el confinamiento e imposibilidad de afectar a zonas contiguas, se incluye una indicación de los elementos o zonas contiguas que pueden afectar o verse afectadas por la propagación del incidente.

## **2.7.- ERCROS**

De acuerdo con el Plan de Autoprotección de la empresa, para la identificación de accidentes se han analizado las sustancias peligrosas presentes en las instalaciones y los sucesos iniciadores.

## **2.8.- POLIDUX**

De acuerdo con el Plan de Autoprotección de la empresa, para la identificación de los riesgos propios de la actividad, se han analizado las sustancias peligrosas presentes en las instalaciones, teniendo en cuenta instalaciones y operaciones que se van a realizar, condiciones de almacenamiento y tomando como indicadores sucesos genéricos buscados en fallos de materiales o componentes, errores de diseño o construcción, impactos externos...

Para el caso de fuga de líquidos en el interior de cubeto, las condiciones de la fuga dependen de las dimensiones del cubeto, que limitan la cantidad de materia evaporada y definen la geometría de la llama.

Para la identificación de los accidentes se tiene en cuenta las condiciones de operación y diseño de los equipos en los que se ven involucradas sustancias con características de peligrosidad, así como el riesgo de incendios en edificios.

## 3.- METODOLOGÍA PARA DEFINIR LAS ZONAS OBJETO DE PLANIFICACIÓN

### 3.1.- Consideraciones generales

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 comporte. 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. Así mismo, 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 o tubería.
- ◇ 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 las consecuencias mediante la metodología Probit.

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

### **3.2.- Fugas y evaporaciones**

Se entiende por fuga la salida incontrolada de materias de continentes (depósitos, tuberías, reactores...) 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 del tipo de continente:
  - ◆ Fuga de recipiente: depósito, tanque, cisterna, reactor...
  - ◆ Fuga de tubería.
- ◇ 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.

### **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.

## 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 las conducciones
  - ◆ Presión de la conducción
  - ◆ Temperatura de la sustancia en la conducción
- ◇ Datos de los recipientes
  - ◆ Dimensiones del recipiente (volumen, altura, 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

## 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 siguiente manera:

### 1. Fuga de líquido.

Fuga isoterma de líquido.

Depósito (esférico, vertical u horizontal).  
Tubería.

Fuga adiabática de líquido.

Depósito (esférico, vertical u horizontal).

### 2. Fuga de gas/vapor.

Fuga isoterma de gas/vapor.

Depósito (esférico, vertical u horizontal).  
Tubería.

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.

### **3.3.- Dispersión de una nube tóxica**

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".

#### **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 remoción 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 gotículas 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.

### 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.

### 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  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las dispersividades en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente, mientras que  $\sigma_z^*$  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  $\sigma_z^*$  es la que tiene en cuenta la topografía del terreno al que se aplica el modelo gaussiano y se relaciona con la  $\sigma_z$  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 isopletras (líneas que unen puntos de la misma concentración).

### **3.4.- 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 Multienergía”, basado en la idea de que la explosión se produce únicamente en la parte de la nube que se encuentra parcial o totalmente confinada. Esto significa que la explosión de una nube de vapor será considerada como un conjunto de subexplosiones correspondientes a las distintas áreas de la nube que se encuentran parcialmente confinadas.

#### **Hipótesis y limitaciones**

Este modelo parte de que toda el área confinada es ocupada por una mezcla estequiométrica combustible/aire.

## 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
- ◇ Características del entorno
  - ◆ Presencia de edificaciones
  - ◆ Altura de las edificaciones
  - ◆ Tipo de zona del entorno

## Descripción

Las variables que se determinan son las siguientes:

- ◇ En primer lugar, se determina la masa, ubicación y volumen de la nube explosiva.
- ◇ Se calcula entonces el volumen y la energía de explosión en las zonas obstruidas y no obstruidas de la nube.
- ◇ Con el nivel de energía adecuado y utilizando las ecuaciones que relacionan la presión escalada con la distancia escalada, se determina la sobrepresión estática.

## **3.5.- 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.

## 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.

## 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

## 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 o el diámetro equivalente del cubeto que arde), 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.

### **3.6.- Dardo de fuego**

Tanto en las conducciones como en los depósitos 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 fuente 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.

#### **Hipótesis y limitaciones**

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. Además, considera que la transmisividad atmosférica es debida únicamente al vapor de agua presente, despreciándose el efecto del dióxido de carbono y otros gases.

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.

#### **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

### **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.

### **3.7.- Metodología Probit**

El análisis de consecuencias derivadas de los fenómenos peligrosos asociados a los accidentes mayores 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.

#### **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 o bien a dardos de fuego, y efectos de sobrepresión, debidos a explosiones.

## 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  $Y$  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%.

$V$	$K_1$	$K_2$
$V = t \frac{\sqrt[3]{(q/A)^4}}{10^4}$	-14,9	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.

Para las sustancias presentes en los establecimientos que comprende este plan, las variables anteriores toman los siguientes valores:

Sustancia	n	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>
Cloro	2	-8,29	0,92
Dióxido de azufre	1	-15,67	2,1
Producto de horno (CO)	1	-37,98	3,7

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

## 4.- ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DEL MEDIO AMBIENTE

El análisis de vulnerabilidad del medio ambiente se fundamenta en la identificación, caracterización y valoración sistemática y objetiva de los cuatro componentes del sistema de riesgo: fuentes de riesgo, sistemas de control primario, sistemas de transporte y receptores vulnerables.

Para un determinado escenario accidental, el método consiste en una evaluación y parametrización de cada uno de los componentes del sistema de riesgo, es decir, en el establecimiento de una puntuación según unos criterios establecidos, obteniendo así el Índice Global de Consecuencias Medioambientales (IGCM). Este índice, junto con la probabilidad de ocurrencia del escenario postulado, permite asociar a dicho escenario un valor o Índice de Riesgo Medioambiental (IRM).

### 4.1.- Índice Global de Consecuencias Medioambientales (IGCM)

A continuación, se presenta una breve descripción de los criterios y factores a estudiar y evaluar para cada componente del riesgo.

## Fuentes del riesgo

Dentro de este componente del sistema de riesgo es necesario evaluar las propiedades de las sustancias, indicativo de su peligrosidad, y la cantidad que se ve involucrada.

La peligrosidad se evalúa mediante un conjunto de cinco propiedades (toxicidad, volatilidad, bioconcentración, adsorción y biodegradación), de forma que a la toxicidad se le otorga un mayor peso en el total de la puntuación obtenible.

<b>Toxicidad</b>		<b>Bioconcentración (log BCF)</b>	
<b>Frases R</b>	<b>Puntos</b>	<b>BCF – factor de bioconcentración</b>	<b>Puntos</b>
R50	10	log BCF > 2	2
R50/53	10	1 < log BCF ≤ 2	1
R51/53	8	log BCF ≤ 1	0
R52/53	5		
R52	5		
R53	5		
<b>Volatilidad (log H)</b>		<b>Adsorción (log Kow)</b>	
<b>H – constante de Henry</b>	<b>Puntos</b>	<b>Kow – coeficiente de reparto</b>	<b>Puntos</b>
<b>(atm·m<sup>3</sup>/mol)</b>		<b>octanol-agua</b>	
log H < -3	5	log Kow > 2	2
-3 ≤ log H < -1	4	1 < log Kow ≤ 2	1
-1 ≤ log H < 1	3	log Kow ≤ 1	0
1 ≤ log H < 2	2		
log H ≥ 2	1		
		<b>Biodegradación (BD)</b>	
		<b>Puntos</b>	
		BD < 2 (meses o periodos mayores)	2
		2 ≤ BD < 2,5 (meses/semanas)	1,5
		2,5 ≤ BD < 3,5 (semanas/días)	1
		3,5 ≤ BD < 4,5 (días/horas)	0,5
		BD ≥ 4,5 (horas)	0

Figura D.1. Criterios utilizados para evaluar la peligrosidad.

Además, se considera la posibilidad de que en el accidente se vean implicadas varias sustancias y que puedan existir efectos sinérgicos entre ellas.

Por otro lado, la cantidad se evalúa en función de la cantidad implicada en el accidente postulado.

<b>Cantidad involucrada (Tm)</b>	<b>Puntos</b>
> 500	10
50-500	7
5-49	5
0,5-4,9	3
< 0,5	1

Figura D.2. Criterios utilizados para evaluar la cantidad.

### Sistemas de control primario

Los sistemas de control primario son los componentes, equipos o sistemas de control dispuestos por el industrial con la finalidad de mantener una determinada fuente de riesgo en condiciones de control permanente.

Este componente del riesgo constituye por lo tanto un factor de corrección de la cantidad de sustancia involucrada en el escenario accidental. Así, establece un determinado porcentaje de reducción, en función de los sistemas de control primario disponibles en el establecimiento, obteniendo la masa efectiva implicada en el suceso.

### Sistemas de transporte

Este componente se evalúa y parametriza a través del cálculo de la extensión espacial del daño medioambiental ocasionado.

Dependiendo del tipo de medio afectado por el accidente (medio acuático o medio no acuático) se establecen criterios de extensión, indicando una puntuación distinta para varios umbrales de extensión.

Medio no acuático	Medio acuático		Puntos
	Corrientes de agua superficiales	Otros tipos	
≥ 10 hectáreas	≥ 10 kilómetros	≥ 2 hectáreas	10
Relación logarítmica decimal del tipo $y = a + b \cdot \log_{10}(x)$			↑ ↓
Dentro de los límites del establecimiento			1

**Figura D.3.** Criterios utilizados para evaluar la extensión del daño.

### Receptores vulnerables

Los receptores vulnerables constituyen los elementos del medio ambiente que pueden verse afectados si están expuestos o entran en contacto con la fuente de riesgo.

La evaluación de la calidad/vulnerabilidad de receptores vulnerables se basa en la determinación del tipo de hábitat en la zona en la que se encuentra el establecimiento, según la cartografía existente del inventario nacional (basada en los tipos recogidos dentro del Anexo I de la Directiva 92/43/CEE) o según la clasificación de hábitat EUNIS.

La metodología presta especial atención al denominado índice de naturalidad del hábitat. En el caso de coincidir varios tipos de hábitat, se escoge el índice de naturalidad del tipo de hábitat con un mayor índice de tipo de cobertura.

Hábitat		Índice de naturalidad	Hábitat prioritario	Puntos
Código J	Código J1, Código J3, Código J4, Código J6	-	-	1
Hábitat de desarrollos industriales y otros tipos de hábitat	Código J2, Código J5	-	-	2
Código I	Código I2	-	-	3
Hábitats agrícolas, hortícolas regular o regularmente cultivados	Código I1	-	-	4
		1	no	5
		1	sí	6
Hábitat clasificados dentro del anexo I de la Directiva 92/43/CEE de hábitat		2	no	7
		2	sí	8
		3	no	9
		3	sí	10

**Figura D.4.** Criterios utilizados para la evaluación de receptores vulnerables.

Una vez determinado el valor asociado a la vulnerabilidad/calidad del hábitat en el que se encuentra el establecimiento, la metodología propone una serie de factores condicionantes que deben considerarse para establecer la puntuación aplicable a este componente del sistema de riesgo. La presencia de espacios naturales protegidos o de especies protegidas, la existencia de inmuebles pertenecientes al patrimonio histórico artístico, la posible reversibilidad/recuperación del daño y el impacto socioeconómico asociado a la alteración de los recursos naturales son estos factores que pueden incrementar la puntuación parcial de receptores vulnerables.

<b>Espacios naturales protegidos</b>		<b>Δ (%)</b>
¿Existen espacios naturales protegidos en el área de influencia del escenario accidental?	sí	30
	no	0
<b>Categoría de protección de especies</b>		<b>Δ (%)</b>
En peligro de extinción		30
Sensibles a la alteración de su hábitat		8
Vulnerables		5
De interés especial		2
Sin categoría de protección		0
<b>Patrimonio histórico artístico</b>		<b>Δ (%)</b>
Bienes inmuebles con la categoría de bien de interés cultural		10
Bienes inmuebles con cualquier otra categoría de protección		5
Ninguna de las anteriores		0
<b>Tiempo de recuperación del daño</b>	<b>Años</b>	<b>Δ (%)</b>
Possible daño permanente	50	
De 5 a 20 años	20	10
De 1 a 5 años	5	
De semanas a 1 año	1	
Días	0,1	5
<b>Impacto socioeconómico</b>		<b>Δ (%)</b>
Alteración de más de una actividad o alteración significativa de una actividad económica directamente relacionada con el medio ambiente <sup>(1)</sup>	Afección de alguno y de los tipos de infraestructuras <sup>(2)</sup>	40
Alteración de más de una actividad o alteración significativa de una actividad económica directamente relacionada con el medio ambiente <sup>(1)</sup>	Afección de alguno o de los tipos de infraestructuras <sup>(2)</sup>	20

<sup>(1)</sup> Agrícola, ganadera, forestal, pesca, minería, industrial, turismo.  
<sup>(2)</sup> Redes de transporte y comunicación, sistemas de almacenamiento y recogida de residuos, suministro y transporte de energía, suministro de agua, infraestructuras de telecomunicaciones

**Figura D.5.** Criterios utilizados para los factores condicionantes.

## **4.2.- Probabilidad de ocurrencia del escenario accidental**

Esta probabilidad o frecuencia puede venir dada a través de un estudio cuantitativo de riesgos o, en aquellos casos en los que no se disponga, de los criterios de la norma UNE 150008 EX "Análisis y evaluación del riesgo medioambiental".

<b>Frecuencia</b>	<b>Puntos</b>
Entre una vez al día y una vez al mes	5
Entre una al mes y una vez al año	4
Entre una vez al año y una vez cada 10 años	3
Entre una vez cada 10 años y una vez cada 50 años	2
Entre una vez cada 50 años y una vez cada 500 años	1

**Figura D.6.** Criterios para el factor frecuencia.

### **4.3.- Índice de Riesgo Medioambiental**

Una vez obtenido el índice o valor de riesgo medioambiental para cada uno de los escenarios accidentales, es necesario establecer los límites de tolerabilidad del riesgo medioambiental. Para ello la metodología evalúa la tolerabilidad en función de los dos factores que lo compone (el índice global de consecuencias medioambientales y la frecuencia de ocurrencia), distinguiendo tres regiones:

- ◇ Región de riesgo elevado: deben ser implantadas medidas de reducción del riesgo, independientemente del coste asociado.
- ◇ Región ALARP (tan bajo como sea factible): el riesgo, aunque tolerable, debería reducirse hasta los niveles más bajos que sea factible, sin incurrir en costes desproporcionados.
- ◇ Región de riesgo moderado: el nivel de riesgo es insignificante.

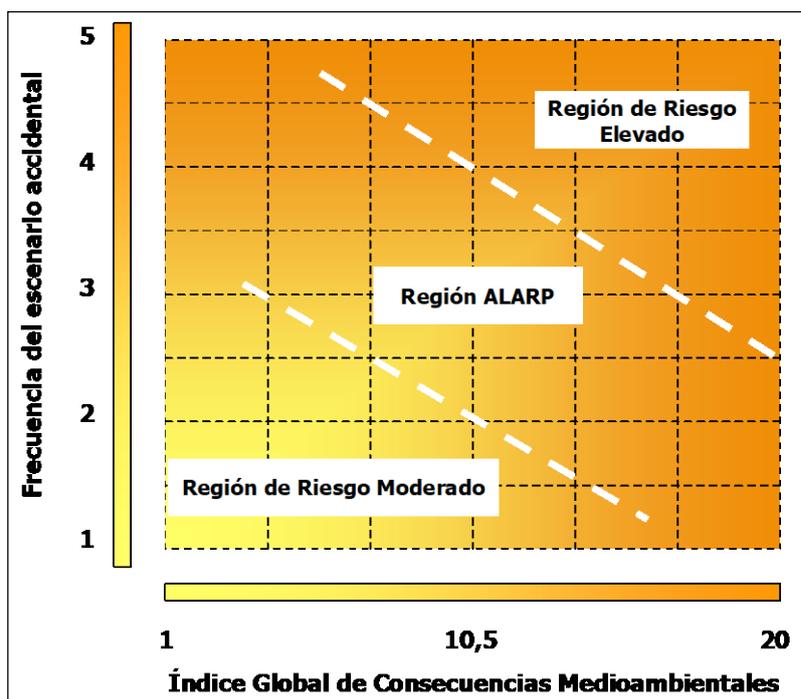


Figura D.7. Evaluación del riesgo medioambiental.

## 5.- ANÁLISIS DEL EFECTO DOMINÓ

El efecto dominó se define (según el Real Decreto 840/2015) como la concatenación de efectos que multiplica las consecuencias, debido a que los fenómenos peligrosos pueden afectar, además de los elementos vulnerables exteriores, otros recipientes, tuberías o equipos del mismo establecimiento o de otros establecimientos próximos, de tal manera que se produzca una nueva fuga, incendio, reventón, estallido en los mismos, que a su vez provoque nuevos fenómenos peligrosos.

A partir de esta definición, se puede deducir lo siguiente:

- ◊ Un efecto dominó implica la existencia de un accidente "primario" que afecta a una instalación "primaria" (este accidente puede no ser un accidente grave), pero que induce uno o varios accidentes "secundarios" que afectan a una o varias instalaciones "secundarias". Este accidente o accidentes secundarios deben ser accidentes más graves y deben extender los daños del accidente "primario".
- ◊ La extensión de los daños es tanto espacial (áreas no afectadas en el accidente primario, ahora resultan afectadas), como temporal (el accidente secundario afecta a la misma zona, pero retardado en el tiempo; en este caso las instalaciones primarias y secundarias pueden ser las mismas), o ambas.

La metodología completa del efecto dominó, consta de 5 etapas: una fase preliminar y cuatro etapas posteriores:

- ◊ Fase preliminar: recogida de la mayor cantidad de datos posible sobre el establecimiento
- ◊ Primera etapa: determinación y localización de los equipos y zonas de equipos peligrosas en cada establecimiento
- ◊ Segunda etapa: a todos los equipos primarios y zonas de equipos se les asigna una categoría y asocia unos tipos de accidentes y efectos, así como sus posibles epicentros.
- ◊ Tercera etapa: determinación de los equipos secundarios que pueden resultar afectados por el efecto dominó a partir de la selección de los equipos y zonas de equipos primarios
- ◊ Finalmente, la cuarta etapa consiste en analizar la relevancia de las parejas de equipos o zonas de equipos identificadas en la etapa anterior.

### **Fase preliminar**

Consiste en la recogida de todos los datos que afectan al establecimiento, así como detalles del proceso y/o procesos que se efectúan.

Los datos que se necesitan son los mismos que se requieren para la elaboración del Informe de Seguridad. Datos sobre las características técnicas de las instalaciones, equipos, sustancias que se utilizan, detalles del proceso...

### **Primera etapa: localización de los equipos potencialmente peligrosos**

Hay que examinar todos los equipos e instalaciones para intentar identificar cualquier pieza de algún equipo que pueda resultar potencialmente peligroso. Estos equipos se agrupan y se elabora una lista con todos los equipos de estas características y una ficha para cada equipo analizado. En esta ficha se deberían incluir datos sobre sustancias peligrosas manejadas, presión, temperatura, volumen o cantidad utilizada, dimensiones de equipos...

### **Segunda etapa: selección de equipos primarios o zonas de equipos primarios, accidentes primarios, efectos asociados y epicentros**

El propósito es seleccionar los equipos o zonas de equipos que pueden iniciar un accidente primario. En principio, sólo se consideran efectos primarios de radiación térmica y efectos mecánicos. Los equipos que sólo presenten riesgos de efectos tóxicos se contemplan en una etapa posterior.

### **Tercera etapa: determinación de equipos secundarios. Criterios básicos**

El propósito es seleccionar cuidadosamente las parejas de equipos de instalaciones diferentes (correspondientes a establecimientos diferentes o dentro de un mismo establecimiento) que pueden verse involucradas en el efecto dominó. Hay que estimar mediante criterios de radiación, sobrepresión y/o alcance de proyectiles las zonas secundarias que podrían resultar afectadas por el accidente primario.

Los criterios que se incluyen en la Directriz básica son los siguientes:

- ◆ Radiación térmica: 8 kW/m<sup>2</sup>.
- ◆ Sobrepresión: 160 mbar.
- ◆ Alcance máximo de los proyectiles producidos por explosión o estallido de depósitos o continentes (la distancia se calcula en función de las hipótesis accidentales consideradas).

#### **Cuarta etapa: análisis detallado del efecto dominó**

Consiste en la verificación de la importancia de las parejas de equipos o zonas de equipos que se han seleccionado en la etapa anterior y realizar un análisis en profundidad de los accidentes seleccionados. La verificación abarca cuatro aspectos:

- ◇ Análisis más detallado de cada accidente: consideraciones teóricas más profundas, estudio de casos similares, uso de herramientas informáticas...
- ◇ Consideración de factores agravantes: configuraciones especiales, inexistencia de sistemas de protección, zonas congestionadas, orientaciones erróneas...
- ◇ Consideración de circunstancias favorables y sistemas de seguridad: aspectos que pueden mitigar el efecto.
- ◇ Experiencia adquirida: ejemplos que pueden ayudar a determinar sucesos primarios y secundarios y a descartar otros.

## **6.- METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PELIGROSAS**

El transporte de mercancías peligrosas presenta los mismos riesgos que la actividad genérica en la que se enmarca, esto es, la circulación de vehículos a través de la infraestructura modal que corresponda (ferrocarril o carretera). No obstante, al riesgo que supone el hecho del transporte en sí, hay que añadir el riesgo que supone la mercancía transportada, cuestión que se analiza en la definición de los índices de peligrosidad y que, para cada clase, se especifica en el apartado 7 del presente anexo. Con todo esto se puede afirmar que lo que singulariza al transporte de mercancías peligrosas respecto a cualquier otro tipo de transporte, son sus posibles consecuencias, una vez que ha ocurrido el accidente.

A continuación se va a analizar la metodología de evaluación del riesgo del transporte de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril teniendo en consideración el volumen y peligrosidad de las mercancías transportadas y la afectación a los núcleos de población por los que transcurren dichas vías.

Esta metodología, extraída del estudio de INECO denominado "El transporte de mercancías peligrosas en Aragón" (diciembre de 1989), consiste en la definición de unos índices de riesgo que caracterizan el proceso de transporte de mercancías peligrosas. Los índices de riesgo son:

- ◆ Índice de frecuencia de accidentes,  $I_f$
- ◆ Índice de riesgo de la infraestructura, IRI
- ◆ Índice de riesgo de accidentes,  $I_1$
- ◆ Índice de impacto como consecuencia de un posible accidente,  $I_2$
- ◆ Índice de riesgo conjunto, IRC

### **6.1.- Índice de frecuencia, $I_f$**

La tasa de accidentabilidad o índice de frecuencia de accidentes ( $I_f$ ) determina el número de accidentes que han tenido lugar, durante un cierto período de tiempo.

El índice de frecuencia se define como la relación entre el número de accidentes que han tenido lugar en un período de tiempo determinado y el tráfico que ha circulado en dicho período, expresado en vehículos-kilómetro o toneladas-kilómetro. De esta forma el índice de frecuencia representa el grado de accidentalidad o de riesgo de accidente en los tramos, trayectos o relaciones consideradas en cada uno de los medios de transporte (carretera o ferrocarril), siendo representativo del conjunto de factores que caracterizan la actividad del transporte.

### **6.2.- Índice de riesgo de la infraestructura, IRI**

Para el caso exclusivo de carreteras, el estudio realizado por INECO en 1982, que lleva por título "Actuaciones para disminuir el riesgo de mercancías peligrosas por carretera", llegó a cuantificar la influencia de cada uno de los factores que influyen en la producción de accidentes en carretera, tales como conductor, el entorno, el vehículo o la carretera, básicamente tras analizar las causas de accidentes en una serie de años. La conclusión principal es que entre el 5-10% de las causas de accidentes estriban en el estado de la vía de comunicación. En dicho estudio se establecía una clara correlación entre los valores de índice de riesgo debido a las condiciones estructurales (anchura, duplicación de calzadas, arcones, estado del firme, intersecciones, etc.) y el índice de frecuencia de accidentes. Dicha correlación es:

$$I_f = -10,445799 + 1,7956 \cdot \ln(IRI)$$

donde,

$I_f$  = índice de frecuencia de accidentes

IRI = índice de riesgo debido a la infraestructura

De dicho estudio, los factores o causas considerados como característicos de la vía de comunicación (carretera en este caso) que de una u otra forma pueden influir en los accidentes son básicamente los siguientes:

- ♦ Número de carriles por sentido.
- ♦ Separación de calzadas.
- ♦ Ancho de calzada (sumando los dos sentidos).
- ♦ Arcenes y anchura de los mismos.
- ♦ Estado del firme: bueno, regular o malo.
- ♦ Existencia de cruces a nivel.
- ♦ Radio de las curvas.
- ♦ Velocidad del recorrido.
- ♦ Cantidad de vehículos que circulan.

La determinación de los índices de riesgo debidos a la infraestructura se realiza combinando los valores cuantitativos o de calidad establecidos para cada uno de los factores considerados, asignando el valor 100 a la magnitud que caracteriza cada factor en la situación más desfavorable de todas las posibles que caracteriza a cada uno de los factores. De acuerdo con la metodología, esta magnitud tendrá un valor inferior a 100 en el resto de los tramos, obteniéndose un índice global de riesgo debido a la infraestructura en cada tramo como suma de los valores mencionados para cada uno de los factores.

### **6.3.- Índice de riesgo de accidentes, $I_1$**

El índice de riesgo de accidentes ( $I_1$ ) representa el riesgo de que se produzca un accidente en un determinado tramo de la red debido al volumen de mercancía peligrosa que se transporta por ese tramo concreto. Por lo tanto, este índice  $I_1$  tiene en cuenta tanto el índice de frecuencia de accidentes ( $I_f$ ), como el volumen de mercancías peligrosas que se transportan, expresado en toneladas-kilómetro.

Para la determinación del tráfico de mercancías peligrosas existente en cada tramo de la red de carreteras y ferrocarril, expresado en vehículos-kilómetro, se ha fijado una capacidad de carga para los camiones cisterna de transporte de mercancías peligrosas de 20 toneladas y para vagones cisterna de 45 toneladas. De esta forma se obtiene el índice de riesgo de accidentes homogéneo para ambos modos de transporte, como aplicación del índice de frecuencia de accidentes en cada tramo expresado en accidentes/ $10^6$  vehículos · km, con el volumen de tráfico correspondiente a cada tramo.

La relación que existe es, pues:

$$I_1 = I_f \cdot \text{n}^\circ \text{ de vehículos} \cdot \text{km}$$

### **6.4.- Índice de impacto, $I_2$**

Este índice representa la gravedad o consecuencias a las que puede dar lugar un accidente con mercancías peligrosas, una vez que dicho accidente ya se ha producido y afecta a un determinado número de personas debido a la peligrosidad de la materia transportada.

Cuando ocurre un accidente en el que se ve implicada una mercancía peligrosa, la posible población afectada por el accidente es función de dos factores básicos:

- ◊ el número de personas que se ven más directamente afectadas por residir en núcleos poblacionales localizados a lo largo del itinerario seguido por los tráficos de mercancías peligrosas y,
- ◊ la naturaleza de la mercancía peligrosa de que se trate, que determina el grado de afectación a que se ven sometidos los núcleos urbanos implicados. La naturaleza de peligro de cada mercancía se expresa mediante el índice de peligrosidad (IP).

Teniendo en cuenta lo anterior, para la determinación del índice de impacto ( $I_2$ ) será necesario considerar en primer lugar, la relación de núcleos urbanos localizados a lo largo del tramo de carretera o ferrocarril considerado y la población de cada uno de ellos y, en segundo lugar, el impacto concreto que el accidente tiene, que depende del valor de IP de la mercancía.

De esta forma, el índice de impacto ( $I_2$ ) refleja el número de personas que se verían realmente afectadas por un accidente de mercancías peligrosas y se calcula como un porcentaje (que depende del índice de peligrosidad de la sustancia) de la población total de cada núcleo o conjunto de núcleos afectados por un tramo. Aquellos tramos de la red de carreteras o de ferrocarriles que no atraviesan núcleos habitados o circulan alejados de los mismos presentan un índice de impacto nulo.

$$I_2 = \text{población} \cdot \% \text{afectación}$$

Los porcentajes de afectación para el cálculo de la población afectada según los índices de peligrosidad de las materias para carretera y ferrocarril son los siguientes:

IP mercancía	Porcentaje de población afectada		
	Autopista/Autovía	Carretera nacional	Ferrocarril
1, 2 y 3	1,5 %	3,1 %	4,2 %
4	5,6 %	10,9 %	14,2 %
5	9,2 %	18,6 %	24,2 %

**Tabla D.1.** Porcentajes de afectación de la población por el transporte de mercancía peligrosa.

Para la determinación de este índice de impacto, sólo se consideran los núcleos de población en los que la vía de comunicación les afecta a una distancia menor o igual de 500 metros. Además, la población asignada a cada tramo se considera como la suma de los municipios de ese tramo. Si una localidad pertenece a dos tramos distintos, se adopta un criterio conservador, sumando su población en los dos tramos a los que pertenece.

## **6.5.- Índice de riesgo conjunto, IRC**

Una vez determinados el índice de riesgo de accidentes y el índice de impacto,  $I_1$  e  $I_2$  respectivamente, es necesario obtener el riesgo conjunto que representan los dos índices, mediante del producto de ambos, asignándoles el mismo valor de ponderación, la unidad. En consecuencia,

$$IRC = I_1 \cdot I_2$$

donde: IRC = Índice de riesgo conjunto  
 $I_1$  = Índice de riesgo de accidentes  
 $I_2$  = Índice de impacto de accidentes

El hecho de asignar un factor de ponderación igual a la unidad al índice  $I_1$  y al  $I_2$ , significa que se está dando el mismo peso al índice de frecuencia de accidentes ( $I_f$ ) que a la potencial población afectada.

El resultado final es que los índices de riesgo conjunto para cada tramo definirán aquellos puntos de mayor riesgo en toda la red de carreteras y ferrocarriles de la Comunidad Autónoma de Aragón. Es decir, permitirán definir las áreas de especial exposición como aquéllas en las que el índice de riesgo conjunto esté entre los más elevados de todos los tramos de la red considerada.

## **7.- METODOLOGÍA PARA LA DEFINICIÓN DE LOS ÍNDICES DE PELIGROSIDAD**

En general, la clasificación de las mercancías peligrosas que se establece en las reglamentaciones nacionales e internacionales (ADR y RID) se realiza con arreglo a las características físicas, químicas, biológicas, reactivas... que presentan dichas materias, dando lugar a su agrupación en las denominadas clases. Esta clasificación, en principio, guarda una ligera relación con el riesgo o magnitud del peligro inherente a cada producto o sustancia.

No obstante, al aplicar el criterio de los volúmenes o intensidades de materias que circulan por una determinada vía o por un punto de esa vía, se pretende aplicar la peligrosidad potencial que tales flujos suponen en el entorno. Esto lleva a establecer, paralelamente al sistema de clasificación de las reglamentaciones nacionales e internacionales, otro que sí tenga en cuenta las características intrínsecas de peligro de cada producto, incluso diferentes tipos de peligros para cada materia, dando lugar a una agrupación de las mercancías peligrosas según los denominados Índices de Peligrosidad (I.P.). Este sistema, basado en un estudio realizado por INECO en 1989 denominado "El transporte de mercancías peligrosas en Aragón", permite clasificar a las sustancias en 5 niveles de menor (IP=1) a mayor peligrosidad (IP=5).

### **7.1.- Criterios particulares para la clasificación**

La aplicación de unos criterios permite la clasificación de todos los productos en cinco niveles de peligrosidad, caracterizado cada nivel por su correspondiente Índice de Peligrosidad. Cada uno de estos niveles y su índice de peligrosidad correspondiente lleva consigo una determinada intensidad de riesgo y por tanto, una incidencia potencial diferente en el posible entorno afectado de mayor o menor gravedad, lo que permite, junto con otros factores que también influyen en este riesgo, establecer la relación de prioridades de actuación que sea preciso considerar en cada caso.

Para esta clasificación se ha tenido en cuenta sólo la materia clasificada, sus soluciones o sus mezclas. No se ha tenido en cuenta el cargamento común de varias mercancías en un

mismo vehículo, ni en un mismo envase colectivo. Estos índices, además, son aplicables tanto al transporte por carretera como por ferrocarril.

Hay que resaltar que existen productos con igual número de identificación de peligro (parte superior del panel naranja que debe acompañar a todo transporte de mercancías peligrosas) y, sin embargo, se les aplica distinto índice de peligrosidad; esta circunstancia se debe a que a veces el factor determinante del índice de peligrosidad corresponde al riesgo principal y otras veces existe una “combinación de riesgos” basada en la gravedad de los posibles accidentes que puedan originarse, así como en la mayor o menor facilidad para ser neutralizados sus efectos.

## **7.2.- Sistemas de clasificación**

Para la clasificación de las mercancías se han establecido cinco niveles de peligrosidad, según los riesgos que presente cada producto de acuerdo con su inflamabilidad, toxicidad o corrosividad, peligro de reacción violenta por descomposición instantánea, polimerización, inestabilidad, reactividad..., peligro de explosión, radioactividad... Valorando estos aspectos de cada materia, conjuntamente con el estado físico durante el transporte, se han clasificado las mercancías peligrosas agrupándolas por Índices de Peligrosidad, de mayor (IP=5) a menor peligrosidad (IP=1).

Para la valoración individual de cada aspecto se han utilizado una serie de criterios basados en los que aparecen en el Acuerdo Europeo sobre Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR), en los criterios de clasificación del Reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas aprobado en el Real Decreto 363/1995, así como en criterios obtenidos de las Fichas de Intervención del País Vasco. Estos criterios se encuentran detallados a continuación para cada aspecto peligroso que puede presentar una materia.

### **7.2.1.- Inflamabilidad**

Para valorar la inflamabilidad de una sustancia es necesario acudir a su punto de inflamación, que es la temperatura mínima a la que hay que calentar una sustancia para que, al aportar una fuente de ignición, se inflame.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
alto	Temperatura de ebullición $\leq$ 35 °C
medio	Temperatura de ebullición $>$ 35 °C Temperatura de ignición $<$ 23 °C
ligero	Temperatura de ebullición $>$ 35 °C 23 °C $\leq$ Temperatura de ignición $\leq$ 60 °C
bajo	Temperatura de ebullición $>$ 35 °C Temperatura de ignición $>$ 60 °C

Estos criterios de alto, medio y ligero corresponden con los que aparecen en el ADR para asignar el grupo de embalaje para los líquidos inflamables. Así, una mercancía enumerada en la

tabla A del ADR como perteneciente a la clase 3, puede valorarse directamente su inflamabilidad, dependiendo del grupo de embalaje.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
alto	Clase 3, grupo de embalaje I
medio	Clase 3, grupo de embalaje II
ligero	Clase 3, grupo de embalaje III

Por similitud con los líquidos inflamables (clase 3), la valoración de la inflamabilidad de las materias pertenecientes a la clase 4.1 puede realizarse directamente atendiendo también al grupo de embalaje asignado en el ADR.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
alto	Clase 4.1, grupo de embalaje I
medio	Clase 4.1, grupo de embalaje II
ligero	Clase 4.1, grupo de embalaje III

### 7.2.2.- Toxicidad

Para valorar la toxicidad de una sustancia es necesario acudir a los valores de dosis, los cuales se definen de la siguiente manera:

- ◇ Por DL<sub>50</sub> (dosis letal media) para la toxicidad aguda por ingestión se entiende la dosis estadísticamente establecida de una materia que, administrada una sola vez y por vía oral, es susceptible de causar la muerte, en un plazo de 14 días, a la mitad de un grupo de ratas jóvenes albinas adultas. La DL<sub>50</sub> se expresa en masa de materia estudiada por unidad de masa corporal del animal sometido al experimento (mg/kg).
- ◇ Por DL<sub>50</sub> (dosis letal media) para la toxicidad aguda por absorción cutánea se entiende la dosis de materia administrada por contacto continuo, a lo largo de 24 horas, sobre la piel desnuda de conejos albinos que tenga las mayores probabilidades de causar la muerte, en un plazo de 14 días, a la mitad de los animales del grupo. El resultado se expresa en mg por kg de peso del cuerpo.
- ◇ Por CL<sub>50</sub> (concentración letal media) para la toxicidad aguda por inhalación se entiende la concentración de vapor, niebla o polvo administrada por inhalación continua durante una hora a un grupo de ratas jóvenes albinas adultas, machos y hembras, que tenga las mayores probabilidades de causar la muerte, en un plazo de 14 días, a la mitad de los animales del grupo. El resultado se expresa en mg por litro de aire, para los polvos y nieblas, y en ml por m<sup>3</sup> de aire (ppm), para los vapores.

A continuación en la tabla siguiente se recogen los criterios de valoración de la toxicidad, dependiendo de la vía de penetración. En ella, la letra "V" representa la concentración (en mL/m<sup>3</sup> de aire) de vapor (volatilidad) saturada en el aire a 20 °C y a la presión atmosférica normal. Además, los criterios de toxicidad por inhalación de vapores están basados en los datos relativos

a la CL<sub>50</sub> para una exposición de una hora. En el caso de disponer únicamente de datos relativos a la CL<sub>50</sub> para una exposición de cuatro horas, los valores correspondientes podrán ser multiplicados por dos.

valor	critero
alto	Ingestión: DL <sub>50</sub> ≤ 5 mg/kg Absorción piel: DL <sub>50</sub> ≤ 50 mg/kg Inhalación: V ≥ 10·CL <sub>50</sub> y CL <sub>50</sub> ≤ 1000 mL/m <sup>3</sup>
medio	Ingestión: 5 < DL <sub>50</sub> ≤ 50 mg/kg Absorción piel: 50 < DL <sub>50</sub> ≤ 200 mg/kg Inhalación: V ≥ 10·CL <sub>50</sub> y CL <sub>50</sub> ≤ 3000 mL/m <sup>3</sup>
ligero	Ingestión: 50 < DL <sub>50</sub> < 300 mg/kg Absorción piel: 200 < DL <sub>50</sub> < 1000 mg/kg Inhalación: V ≥ 1/5·CL <sub>50</sub> y CL <sub>50</sub> ≤ 5000 mL/m <sup>3</sup>

Estos criterios están basados en los efectos provocados en el ser humano en determinados casos de intoxicación accidental, así como las propiedades particulares de la materia, como el estado líquido, la volatilidad, propiedades particulares de absorción y efectos biológicos especiales. En caso de no existir observaciones sobre el ser humano, se fija el grado de toxicidad en función de los ensayos sobre animales. Establecidos los criterios de esta forma coinciden con los que aparecen en el ADR para asignar el grupo de embalaje para las materias tóxicas (clase 6.1). Por tanto, una mercancía enumerada en la tabla A del ADR como perteneciente a la clase 6.1, puede valorarse directamente su toxicidad, dependiendo del grupo de embalaje.

valor	critero
alto	Clase 6.1, grupo de embalaje I
medio	Clase 6.1, grupo de embalaje II
ligero	Clase 6.2, grupo de embalaje III

### 7.2.3.- Corrosividad

Para valorar la corrosividad de la sustancia se acude a los efectos sobre la piel humana.

valor	critero
alto	Provocan la destrucción del tejido cutáneo intacto en todo su espesor en 60 minutos tras una aplicación de 3 minutos de duración
medio	Provocan la destrucción del tejido cutáneo intacto en todo su espesor en 14 días tras una aplicación de 3 a 60 minutos de duración
ligero	Provocan la destrucción del tejido cutáneo intacto en todo su espesor en 14 días tras una aplicación de 60 minutos a 4 horas de duración o materias que no provocan la destrucción del tejido cutáneo intacto en todo su espesor, pero la velocidad de corrosión en

---

superficies de acero o aluminio supera 6,25 mm al  
año a 55 °C

---

Estos criterios coinciden con los establecidos por el ADR para fijar el grupo de embalaje de las materias corrosivas (clase 8). Por tanto, una mercancía enumerada en la tabla A del ADR como perteneciente a la clase 6.1, puede valorarse directamente su toxicidad, dependiendo del grupo de embalaje.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
alto	Clase 8, grupo de embalaje I
medio	Clase 8, grupo de embalaje II
ligero	Clase 8, grupo de embalaje III

Además de estos criterios, hay establecidos otros para valorar la corrosividad de aquellas materias en las que la corrosividad se trata de un riesgo subsidiario. Estos criterios se basan en la clasificación de esta sustancia en el Real Decreto 363/1995 y posteriores modificaciones, diferenciando en cuatro grados.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
alto	Corrosivo. Provoca quemaduras graves (C, R35)
medio	Corrosivo. Provoca quemaduras (C, R34)
ligero	Irritante. Riesgo de lesiones oculares graves (Xi, R41)
bajo	Irritante. Irrita los ojos, la piel y las vías respiratorias (Xi, R36/37/38)

#### **7.2.4.- Peligrosidad para el medio ambiente**

Para valorar la peligrosidad para el medio ambiente de la sustancia se acude a los valores de toxicidad aguda para los organismos acuáticos, que se definen de la siguiente manera:

- ◇ CL<sub>50</sub>: Concentración de una materia en el agua, que causa la muerte del 50% (la mitad) del grupo de animales sometidos al ensayo.
- ◇ CE<sub>50</sub>: Concentración efectiva media de materia que inmoviliza el 50% de las Daphnia en agua dulce.
- ◇ CI<sub>50</sub>: Concentración de inhibición que da lugar a una reducción del 50% de crecimiento de alga verde unicelular.

Además de estos valores, también se valora la peligrosidad para el medio ambiente en función de los posibles efectos negativos que puede provocar una sustancia a largo plazo.

Los criterios aplicados son los recogidos en la tabla siguiente, que coinciden con los criterios establecidos en el Real Decreto 363/1995 para este tipo de peligrosidad, es decir con la aplicación de las frases de riesgo R50 (muy tóxico para los organismos acuáticos), R51 (tóxico

para los organismos acuáticos), R52 (nocivo para los organismos acuáticos) y R53 (puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático).

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
alto	Peces: CL <sub>50</sub> 96 h ≤ 1 mg/L Daphnia: CE <sub>50</sub> 48 h ≤ 1 mg/L Algas: CI <sub>50</sub> 72 h ≤ 1 mg/L R50
medio	Peces: 1 mg/L < CL <sub>50</sub> 96 h ≤ 10 mg/L Daphnia: 1 mg/L < CE <sub>50</sub> 48 h ≤ 10 mg/L Algas: 1 mg/L < CI <sub>50</sub> 72 h ≤ 10 mg/L R51
ligero	Peces: 10 mg/L < CL <sub>50</sub> 96 h ≤ 100 mg/L Daphnia: 10 mg/L < CE <sub>50</sub> 48 h ≤ 100 mg/L Algas: 10 mg/L < CI <sub>50</sub> 72 h ≤ 100 mg/L R52
bajo	La sustancia no es fácilmente degradable o el logaritmo del coeficiente de reparto octanol/agua es superior a 3,0, salvo que el factor de bioconcentración determinado experimentalmente sea inferior a 100. R53

### 7.2.5.- Combustión

Para valorar la combustión, se tienen en cuenta los distintos comportamientos del producto durante la misma. Se trata de un riesgo que acrecienta el riesgo de inflamabilidad por lo que su valoración no llega a “alto”.

Se consideran que no tienen ningún riesgo añadido aquellas materias inflamables que desprenden monóxido y dióxido de carbono durante la combustión, así como por supuesto las materias no inflamables. Para el resto de casos, el criterio de valoración se recoge en la siguiente tabla.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
medio	Materias inflamables en contacto con el aire en ausencia de fuente de ignición (espontáneas), en cuya combustión se liberan gases tóxicos y/o corrosivos
ligero	Materias inflamables en contacto con el aire en ausencia de fuente de ignición (espontáneas)
bajo	Materias inflamables que desprenden gases tóxicos y/o corrosivos en la combustión, sin considerar como tales el dióxido ni el monóxido de carbono. Se incluyen las materias comburentes que, a pesar de no ser inflamables, producen la combustión de materiales inflamables, reacción en la cual se desprenden gases tóxicos y/o corrosivos

### 7.2.6.- Aumento de temperatura

Para valorar el riesgo asociado al aumento de temperatura, se tienen en cuenta los distintos comportamientos del producto con el calor. Al igual que el anterior, se trata de un riesgo subsidiario por lo que su valoración no llega a “alto”.

Se consideran que no tienen ningún riesgo añadido aquellas materias que no reaccionan, es decir que al aumentar la temperatura no sufren ninguna reacción. Para el resto de casos, el criterio de valoración se recoge en la siguiente tabla.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
medio	Materias que al aumentar la temperatura desprenden gases tóxicos y/o corrosivos e inflamables
ligero	Materias que al aumentar la temperatura desprenden gases inflamables
bajo	Materias que al aumentar la temperatura desprenden gases tóxicos y/o corrosivos

### 7.2.7.- Reacción con el agua

Para valorar este riesgo, se tienen en cuenta los distintos comportamientos del producto con el agua. Al igual que los dos anteriores, se trata de un riesgo subsidiario por lo que su valoración no llega a “alto”.

Se consideran que no tienen ningún riesgo añadido aquellas materias que no reaccionan, es decir, que al contacto con el agua no experimentan ninguna reacción. Para el resto de casos, el criterio de valoración se recoge en la siguiente tabla.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
medio	Materias que reaccionan con el agua con desprendimiento de gases tóxicos y/o corrosivos e inflamables. Materias que se disuelven en el agua formando productos corrosivos e inflamables en estado líquido
ligero	Materias que reaccionan con el agua con desprendimiento de gases tóxicos y/o corrosivos. Materias que se disuelven en el agua formando productos corrosivos en estado líquido
bajo	Materias que reaccionan con el agua con desprendimiento de calor

### 7.2.8.- Modo de transporte

Otro riesgo subsidiario es el modo de transporte de los gases, siendo los criterios de valoración los recogidos en la tabla siguiente.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
ligero	Gas licuado a presión Gas comprimido a presión
bajo	Gas licuado refrigerado Gas disuelto

Estos criterios coinciden con los establecidos por el ADR para fijar el código de clasificación de los gases (clase 2). Por tanto, para una mercancía enumerada en la tabla A del ADR como perteneciente a la clase 2, puede valorarse directamente este riesgo, dependiendo del código de clasificación.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
ligero	Clase 2, código de clasificación 2 Clase 2, código de clasificación 1
bajo	Clase 2, código de clasificación 3 Clase 2, código de clasificación 4

### **7.3.- Consideraciones y condiciones de clasificación**

Una vez valorados todos los riesgos que pueden estar presentes en una mercancía, según los criterios indicados en el apartado anterior, se le pueden adjudicar un Índice de Peligrosidad (IP). Para ello, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- ◊ A un producto que tenga dos o más riesgos altos, se le asigna el índice de peligrosidad máximo (5), al igual que a un producto con un riesgo alto y otro medio.
- ◊ Un producto que tenga un solo riesgo alto, conlleva la asignación de un índice de peligrosidad elevado (4), así mismo como a un producto con un riesgo alto y otro ligero o bajo y a un producto con 4 o más riesgos medios o 3 riesgos medios y uno ligero.
- ◊ Por coincidencia en un determinado producto de tres riesgos de tipo medio o 2 riesgos de tipo medio y un ligero, se le ha asignado un índice de peligrosidad igual a 3.
- ◊ A un producto que tenga un riesgo medio, se le asigna el índice de peligrosidad igual a 2.
- ◊ Al resto de opciones de riesgo se le asigna el índice de peligrosidad más bajo (1).

Además de estos criterios, en el caso de materias pertenecientes a las clases 1 (materias explosivas) y 7 (materias radiactivas) la asignación del índice de peligrosidad se realiza directamente.

En el caso de materias y objetos explosivos, esta asignación del índice de peligrosidad se realiza en función de la división a la que pertenecen, según el ADR:

- ◇ División 1.1: Materias y objetos que presentan un riesgo de explosión en masa (una explosión en masa es una explosión que afecta de manera prácticamente instantánea a casi toda la carga).
- ◇ División 1.2: Materias y objetos que presentan un riesgo de proyección sin riesgo de explosión en masa.
- ◇ División 1.3: Materias y objetos que presentan un riesgo de incendio con ligero riesgo de efectos de onda expansiva o de proyección o de ambos efectos, pero sin riesgo de explosión en masa,
  - ◆ cuya combustión da lugar a una radiación térmica considerable, o
  - ◆ que arden unos a continuación de otros con efectos mínimos de onda expansiva o de proyección o de ambos efectos.
- ◇ División 1.4: Materias y objetos que sólo presentan un pequeño riesgo de explosión en caso de ignición o cebado durante el transporte. Los efectos se limitan esencialmente a los bultos y normalmente no dan lugar a la proyección de fragmentos de tamaño apreciable ni a grandes distancias. Un incendio exterior no debe implicar la explosión prácticamente instantánea de la casi totalidad del contenido de los bultos.
- ◇ División 1.5: Materias muy poco sensibles que presentan un riesgo de explosión en masa, con una sensibilidad tal que, en condiciones normales de transporte, sólo existe una probabilidad muy reducida de cebado o de que su combustión se transforme en detonación. Se exige como mínimo que no exploten cuando se las someta a la prueba de fuego exterior.
- ◇ División 1.6: Objetos extremadamente poco sensibles que no supongan riesgo de explosión en masa. Dichos objetos no contendrán más que materias detonantes extremadamente poco sensibles y que presenten una probabilidad despreciable de cebado o de propagación accidental.

En la tabla siguiente, se recoge el criterio de asignación de los índices de peligrosidad.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
IP = 5	Clase 1, división 1.1 y 1.5
IP = 4	Clase 1, división 1.2 y 1.3
IP = 3	Clase 1, división 1.4 y 1.6

En el caso de materias radiactivas, esta asignación del índice de peligrosidad se realiza en función de la categoría de los bultos y sobreembalajes y por tanto de las etiquetas asignadas a cada materia, según el ADR.

En la tabla siguiente, se recoge el criterio de asignación de los índices de peligrosidad.

<b>valor</b>	<b>criterio</b>
IP = 5	Clase 7, amarilla III, etiqueta 7C
IP = 4	Clase 7, amarilla II, etiqueta 7B
IP = 3	Clase 7, blanca I, etiqueta 7A

En el caso de materias con número ONU perteneciente a un epígrafe colectivo, debido a la enorme variedad de sustancias que puede englobar, se asigna el valor más desfavorable para el riesgo principal y para el resto se asigna un valor de cero. En el caso de riesgo subsidiario se analiza la tabla 2.1.3.10 del ADR para poder analizar el grupo de embalaje correspondiente a cada riesgo.