

Vulnerabilidad de personas e instalaciones

«Ser inmortal es baladí; menos el hombre, todas las criaturas lo son, pues ignoran la muerte.»

El inmortal, cap. IV, Jorge Luis Borges.

«El de Fierabrás es un bálsamo, respondió Don Quijote, de quien tengo la receta en la memoria, con el cual no hay que tener temor a la muerte, ni hay que pensar en morir de ferida alguna... Cuando vieres que en alguna batalla me han partido por medio del cuerpo, como muchas veces suele acontecer, bonitamente la parte del cuerpo que hubiere caído en el suelo, y con mucha sutileza, antes de que la sangre se hiele, la pondrás sobre la otra mitad que quedare en la silla, advirtiendo de encajalla igualmente y al justo. Luego me darás a beber sólo dos tragos del bálsamo que he dicho y verásme quedar más sano que una manzana.»

El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha, primera parte, cap. X, Miguel de Cervantes Saavedra.

Introducción

En los capítulos 2 a 4 se han expuesto los métodos para la identificación de los riesgos significativos en una instalación industrial, y los procedimientos de estimación de las consecuencias previsibles de dichos riesgos. Hasta ahora, los efectos producidos por un determinado accidente se han expresado en función de variables que indican la intensidad física del fenómeno: la radiación térmica por unidad de área que recibe una superficie a 150 metros de un incendio, la sobrepresión y la duración de la fase positiva de la onda de presión en un punto alejado 0,5 km del centro de una explosión, el mapa de concentraciones a los cinco minutos de haberse producido la emisión instantánea de una cierta cantidad de sustancia tóxica, etc. El paso siguiente consiste en la estimación de la vulnerabilidad de personas e instalaciones ante efectos físicos de una magnitud determinada, que pueden calcularse con los procedimientos

procedimientos descritos en los capítulos anteriores y en la bibliografía relacionada. Se busca, por lo tanto, la cuantificación, siquiera de una manera aproximada, de los efectos finales predecibles para un accidente cuyas características se suponen conocidas.

La vulnerabilidad de personas se expresa como el número de individuos que previsiblemente pueden resultar afectadas con un cierto nivel de daño a causa de un accidente. El nivel de daño a que se refiere la previsión debe definirse en el análisis, y puede variar desde molestias y heridas leves, hasta la muerte de los individuos expuestos. Por otro lado, la vulnerabilidad de instalaciones se cuantifica en último término utilizando magnitudes económicas, aunque en este capítulo sólo se realizan estimaciones de daños físicos (demolición parcial de edificios, rotura de cristales, incendio de edificios, etc.). Lógicamente, es necesario tener en cuenta en este caso la vulnerabilidad de las personas en el interior de los edificios e instalaciones afectados, que pueden sufrir las consecuencias del accidente, aunque no estén expuestas a sus efectos de una manera directa. Además hay que tener en cuenta que, en ciertos casos, efectos no fatales en sí mismos, como mareos, parálisis temporal, desorientación, etc., pueden disminuir la capacidad de respuesta, propiciar errores e impedir la evacuación o la huida, causando finalmente la muerte.

La respuesta de los organismos vivos ante agentes externos adversos (por ejemplo, una sustancia tóxica dispersa en la atmósfera) presenta una amplia variabilidad. Existen numerosos efectos biológicos posibles causados por agentes adversos, incluyendo sensibilización de diversos órganos, inflamación, narcosis, irritación, síntomas de asfixia, necrosis de tejidos orgánicos, destrucción parcial del sistema inmunológico, neoplasia, mutagénesis, teratogénesis, etc. Cualquiera de los anteriores puede producir la muerte o no, dependiendo de la severidad de la afección. En casi todas las poblaciones biológicas existen individuos sensibles que, ante la misma intensidad del factor adverso, presentan una respuesta severa, mientras que la mayoría tolera aparentemente bien el mismo nivel de intensidad. Siguiendo con el ejemplo de la inhalación de un tóxico, para una exposición de duración determinada a una concentración fija de la sustancia, algunos individuos pueden llegar a mostrar una reacción intensa (por ejemplo, hipersensibilización pulmonar asmática), mientras que otros apenas presentan irritación alguna. La diversidad de las respuestas se acentúa cuando entre la población expuesta existen diferencias de edad, sexo, estado de salud, etc.

Un posible método de estimación de vulnerabilidad consiste en relacionar directamente la dosis recibida con el efecto considerado. Esto puede conseguirse a partir de evidencia empírica que demuestre que los individuos que han estado sometidos a una cierta dosis del agente dañino (por ejemplo, a un nivel de intensidad de radiación durante un tiempo dado) han sufrido un efecto determinado (por ejemplo, muerte por quemaduras). Como se desprende de lo indicado anteriormente, pocas veces tiene una certeza de este tipo, y las incertidumbres son lo suficientemente importantes como para que el establecimiento del nivel de intensidad que causa un daño determinado tenga, por lo general, escasa utilidad práctica como tal. Así, supongamos que tras el estudio de un accidente con resultado de muerte por inhalación de una sustancia tóxica se consigue determinar la concentración y el tiempo de exposición. La relación intensidad-resultado así determinada no debe utilizarse directamente: una intensidad (dosis) inferior podría haber dado lugar al mismo efecto, la víctima podría haber sido especialmente sensible, o por el contrario haber desarrollado una cierta tolerancia al tóxico, etc.

Por tanto, los métodos que relacionan directamente causas y efectos se utilizan muy poco, y las aproximaciones al problema de la estimación de vulnerabilidad son generalmente de tipo probabilístico. En este capítulo se expone el método Probit (correspondiente a la abreviatura en inglés de «Probability Unit»), que proporciona relaciones sencillas para predecir los efectos adversos de distintas variables, siempre que éstos puedan ser descritos mediante transformaciones de la distribución normal de probabilidad.

Metodología Probit

La escala Probit constituye una manera, muy útil en ciertos aspectos, de medir probabilidades. La relación entre unidades Probit (Y) y probabilidad (P) viene dada por la siguiente ecuación (1):

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp(-u^2/2) du \quad [5.1]$$

La ecuación [5.1] establece una relación biunívoca entre probabilidad y unidades Probit. El resultado es la distribución Probit, de media 5 y

varianza 1. La curva que muestra la relación entre valores de probabilidad, expresados como porcentaje, y unidades Probit se muestra en la figura 5.1.

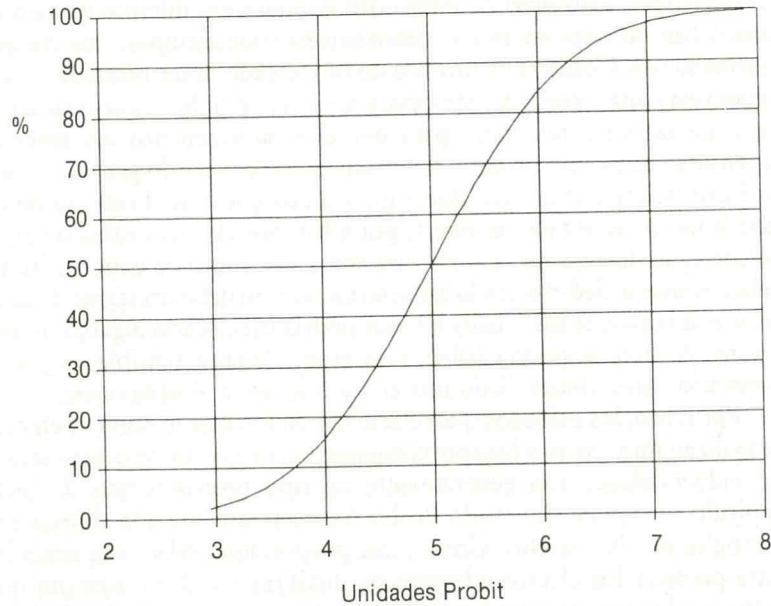


Figura 5.1. Relación entre porcentaje de probabilidad y unidades Probit. (Representado a partir de datos de la referencia 12.)

Se ha señalado anteriormente el hecho de que, con frecuencia, en una población biológica existen individuos capaces de soportar niveles elevados de un factor dañino sin mostrar efectos adversos importantes. A causa de estas irregularidades, las curvas de porcentaje acumulado de población afectada frente a la intensidad del factor causante no siguen la distribución normal, sino que presentan desviaciones. Sin embargo, se encuentra experimentalmente que si el porcentaje de la población afectada se representa no frente a la intensidad del factor causante, sino frente a su logaritmo, los resultados a menudo siguen una distribución normal. En este caso, dadas las características de la variable Probit, puede escribirse que:

$$Y = 5 + \frac{\ln x - \mu}{\sigma} \quad [5.2]$$

Donde μ y σ son, respectivamente, la media y la desviación típica de la distribución normal, y x está relacionado con la intensidad del factor causante, expresado matemáticamente de manera apropiada. La ecuación anterior puede reescribirse en la forma que habitualmente se utiliza en análisis de vulnerabilidad como

$$Y = k_1 + k_2 \ln V \quad [5.3]$$

En este caso k_1 y k_2 son constantes empíricas, y V es una medida de la intensidad del factor causante del daño. La forma de expresión de V varía dependiendo del tipo de efecto estudiado, como se explica más adelante.

La metodología Probit se utiliza ampliamente porque la transformación de probabilidades a unidades Probit expresada en la ecuación [5.1] convierte la típica curva sigmoide de la distribución normal (acumulativa) de probabilidad en una línea recta, lo que facilita la obtención de las constantes k_1 y k_2 . Esta transformación se ilustra en el ejemplo 5.1. La utilización de una relación lineal es especialmente útil cuando se pretende obtener correlaciones de vulnerabilidad a partir de registros de accidentes, de los que raramente se obtienen suficientes datos fiables que relacionen simultáneamente el daño producido y la intensidad del factor causante.

Ejemplo 5.1:

i) A partir de los datos de Eisenberg y cols. (3) sobre los porcentajes de muerte por hemorragia pulmonar en explosiones que se proporcionan en la tabla adjunta, obtener la ecuación Probit correspondiente, sabiendo que la variable V es para este caso igual a la sobrepresión P^o (Pa). ii) Estimar el porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar a una distancia de 50 m de una explosión equivalente a 4.600 kg de TNT.

Sobrepresión $\times 10^{-5}$ (Pa)	1,00	1,20	1,41	1,76	2,00
% de muertes sobre la población expuesta	1	10	50	90	99

Ejemplo 5.1 (continuación):

i) La figura 5.2 muestra la representación de los datos de porcentaje de afectados frente al logaritmo neperiano de la sobrepresión. Puede observarse que los resultados obtenidos siguen aproximadamente la típica curva sigmoide de la distribución normal para porcentajes acumulados.

La representación equivalente en unidades Probit puede observarse en la figura 5.3, donde los porcentajes 1, 10, 50, 90 y 99 se han sustituido por 2,67, 3,72, 5,0, 6,28 y 7,33 unidades Probit, obtenidos a partir de la figura 5.1. La representación es ahora una línea recta ($r = 0,9985$). Los parámetros de regresión, con sus errores estándar, son, respectivamente, $6,693 \pm 0,21$ y $-74,44 \pm 2,54$, ligeramente distintos que los que se proporcionan más adelante (ecuación 5.10), para el mismo caso. La ecuación Probit es, por tanto,

$$Y = -74,44 + 6,693 \ln P^0$$

ii) A 50 metros de una explosión equivalente a 4.600 kg de TNT, la distancia reducida es $z = 50/(4.600)^{1/3} = 3,0 \text{ m/kg}^{1/3}$. Con este valor de la distancia reducida se obtiene una sobrepresión de unos 95.000 Pa (figura 3.9). Sustituyendo este valor en la ecuación anterior se obtiene $Y = 2,273$, por debajo del umbral del 1 por 100 de afectados (ya que el 1 por 100 correspondería a 2,67 unidades Probit).

Efectos de emisiones tóxicas

Una discusión, incluso de profundidad media, de los aspectos toxicológicos que pueden presentar las sustancias en uso en la industria química cae claramente fuera del alcance de este libro. En lo que sigue se realizará una exposición somera de algunos conceptos fundamentales, necesarios para el desarrollo del análisis de riesgos, y se remite al lector que requiera más información a textos apropiados (4), (5), (6), (19), (20).

La predicción de la vulnerabilidad a sustancias tóxicas constituye un problema complejo porque depende de numerosos factores de naturaleza muy distinta. Entre estos factores cabe citar:

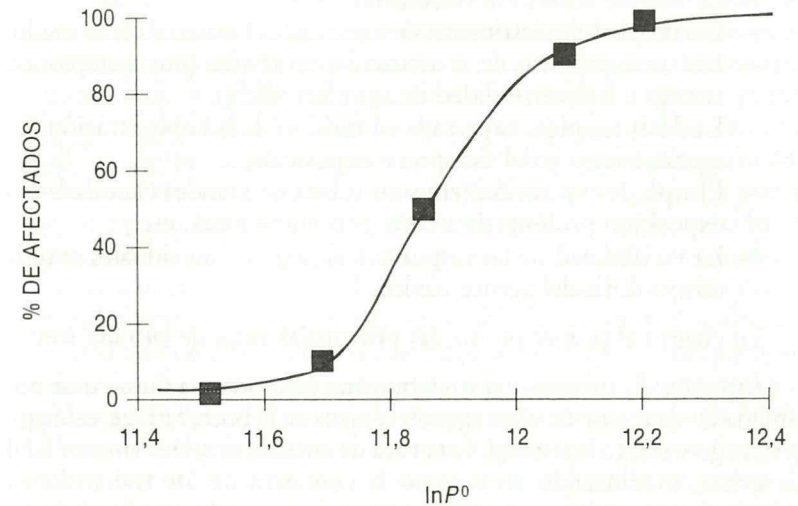


Figura 5.2. Porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar frente al logaritmo de la sobrepresión.

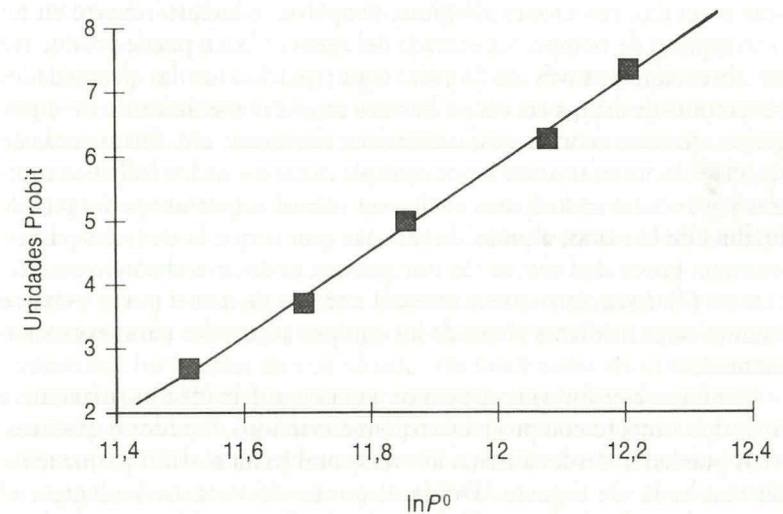


Figura 5.3. Representación de la ecuación [5.3] para los datos del ejemplo 5.1.

- La ruta de entrada al organismo.
- Las propiedades intrínsecas de toxicidad del material considerado.
- Las características de la actuación del tóxico (por ejemplo, en cuanto a la reversibilidad de sus efectos).
- La dosis recibida, expresada en función de la concentración del agente tóxico y del tiempo de exposición.
- El tipo de exposición (emisión súbita de grandes cantidades, o exposición prolongada a bajas concentraciones, etc.).
- La variabilidad de las respuestas biológicas individuales ante la misma dosis del agente tóxico.

En cuanto al primer punto, las principales *rutas de entrada* son:

Ingestión: El sistema digestivo humano proporciona numerosas posibilidades de actuación a los agentes tóxicos en la boca, faringe, esófago, estómago y tracto intestinal. Esta ruta de entrada es relativamente fácil de evitar, modificando en su caso la conducta de los trabajadores, principalmente en lo que se refiere a higiene personal, comida y bebida, y a hábitos peligrosos, tales como la succión en los extremos de tubos flexibles para conseguir iniciar trasvases de líquidos por efecto sifón.

Epidermis: La piel provee otra entrada de tóxicos de gran importancia en un ambiente industrial, con efectos que incluyen inflamaciones crónicas o agudas, reacciones alérgicas, neoplasia, e incluso muerte en un corto espacio de tiempo. La entrada del agente tóxico puede producirse por absorción a través de la piel, o por pérdida de las propiedades protectoras de ésta, a través de heridas causadas mecánicamente o por agentes químicos corrosivos, ulceraciones diversas, etc. Otras rutas de entrada relacionadas, como, por ejemplo, a través de los folículos capilares y glándulas sudoríparas suelen ser menos importantes. La piel de la palma de la mano, a pesar de ser más gruesa que la de otras partes, tiene una porosidad mayor, lo que puede conducir a absorciones más intensas (7). Está claro que la entrada a través de la piel puede evitarse o minimizarse mediante el uso de los equipos adecuados para protección personal.

Contacto con los ojos: Los ojos pueden sufrir efectos adversos a partir del contacto con productos químicos sólidos, líquidos o gaseosos. Éstos pueden ir desde la irritación temporal hasta el daño permanente con resultado de ceguera. Desde el punto de vista toxicológico, el mayor peligro lo constituye la acumulación de materiales a partir de su absorción por los vasos sanguíneos periféricos.

Inhalación: Una persona en reposo respira unos 8 litros de aire cada minuto. Junto con el aire respirado, las sustancias tóxicas que pueda contener poseen así un camino rápido de entrada, que lleva directamente a zonas muy sensibles del organismo. Los gases y vapores pueden alcanzar rápidamente los alvéolos pulmonares, responsables del intercambio gaseoso oxígeno-dióxido de carbono necesario para reoxigenar la sangre. Los efectos de las sustancias dañinas en los alvéolos pueden consistir en su bloqueo físico (polvos insolubles), o en la reacción con la pared del alvéolo para producir sustancias tóxicas o corrosivas. La extensión de la penetración y los efectos que causan los vapores tóxicos dependen entre otros factores de su solubilidad en agua. Así, debido a su elevada solubilidad, tanto el amoníaco como el cloruro de hidrógeno suelen ser absorbidos antes de llegar a los alvéolos. En cuanto a las partículas sólidas, suele aceptarse (8) que las partículas mayores de unas 40-50 micras no entran en el sistema respiratorio, las que tienen un tamaño mayor de 10 micras son depositadas en las vías superiores, las comprendidas entre 2 y 10 micras alcanzan sucesivamente la tráquea, bronquios y bronquiolos y solamente aquellas menores de unas 2 micras alcanzan los alvéolos. En cuanto a las fibras, aquellas con diámetros de hasta 3 micras y longitudes de hasta 50 micras pueden penetrar en el sistema respiratorio, siendo las más peligrosas aquellas de menos de 8 micras de longitud y 1,5 de diámetro.

Ante la entrada de una sustancia tóxica, el cuerpo humano tiene distintos mecanismos que, en determinados casos, son efectivos para la reducción de los niveles de concentración. Así, el producto agresor puede expulsarse vía hígado (excreción de sustancias en el bazo), pulmones (respiración), riñones (orina), y en menor medida a través de la piel (sudor), pelo y uñas. Una segunda vía de eliminación es la transformación metabólica hacia sustancias menos tóxicas. Es el caso de la conversión por vía enzimática de los cianuros a tiocianatos, de menor toxicidad. Sin embargo, en ocasiones la ruta metabólica puede llegar a aumentar los niveles de toxicidad, transformando los compuestos en otros más peligrosos, como ocurre con el tetracloruro de carbono, que sufre la conversión en derivados de mayor toxicidad para el hígado. Por último, las sustancias agresoras también pueden eliminarse del torrente sanguíneo mediante almacenamiento, fundamentalmente en tejidos grasos, lo que puede ocasionar la nueva liberación de las mismas en el futuro, si el organismo utiliza la grasa acumulada.

Indicadores de toxicidad

Como se ha señalado, existe una dificultad considerable en realizar estimaciones precisas de los efectos que un determinado tóxico puede tener sobre organismos vivos. A pesar de ello, o quizá debido precisamente a ello, se han publicado numerosos índices de toxicidad, que proporcionan una idea aproximada de la peligrosidad de una sustancia tóxica.

Un trabajo clásico en esta materia es el de Hodge y Sterner (9), que establecieron la siguiente escala de toxicidad relativa, basada en la administración por vía oral:

Clase de toxicidad	Grado de toxicidad	Valor LD ₅₀
6	Supertóxico	< 5 mg/kg
5	Extremadamente tóxico	5-50 mg/kg
4	Muy tóxico	50-500 mg/kg
3	Moderadamente tóxico	500-5.000 mg/kg
2	Ligeramente tóxico	5-15 g/kg
1	Prácticamente no tóxico	> 15 g/kg

De acuerdo con la escala anterior, con menos de 7 gotas de un producto de la clase 6 es probable la muerte de una persona de 70 kg de peso, mientras que se requeriría del orden de una cucharada para la clase 4 y más de un litro para la clase 1.

Los valores LD₅₀ de la tabla anterior son dosis letales determinadas en animales de laboratorio (ratas), utilizando condiciones experimentales estandarizadas y poblaciones de tamaño adecuado para el análisis estadístico de los resultados. La definición usual (8) del valor LD₅₀ lo expresa como la dosis que, administrada oralmente o por absorción cutánea, causa la muerte del 50 por 100 de los individuos afectados en un período de observación de 14 días. De manera análoga, para productos tóxicos cuya vía de entrada es la inhalación se definen valores LC₅₀ como la concentración de material en el aire cuya inhalación durante cuatro horas es capaz de causar la muerte del 50 por 100 de la población afectada, a lo largo de un período de catorce días.

En España, el Real Decreto 886/1988 sobre prevención de accidentes mayores en determinadas actividades industriales establece en su anexo IV criterios orientativos de peligrosidad de sustancias clasificando como sustancias muy tóxicas a aquellas con un valor LD₅₀ ≤ 5 mg/kg

por vía oral, determinado en ratas, aquellas con un valor LD₅₀ ≤ 10 mg/kg por vía cutánea en ratas o conejos, o aquellas con valores LC₅₀ ≤ 0,1 mg/l en ratas. Otras sustancias con valores LD₅₀ y LC₅₀ mayores pueden presentar una peligrosidad análoga, dependiendo del resto de sus propiedades físicas y químicas.

Los «valores IDLH» (*Immediately dangerous to life or health*) son establecidos por el NIOSH («National Institute for Occupational Safety and Health») para indicar la concentración máxima de una sustancia en aire que un trabajador con buen estado de salud general puede soportar durante treinta minutos sin desarrollar síntomas (como irritación severa ocular o respiratoria), que disminuyan su capacidad de realizar una evacuación de emergencia, y sin sufrir daños irreversibles (como daño a tejidos o muerte). Los valores IDLH no han sufrido puestas al día, y, por lo tanto, deben complementarse con datos toxicológicos más recientes. Es necesario, además, tener en cuenta a la hora de aplicar éste o cualquier otro indicador similar que sus valores se refieren a un trabajador promedio, pudiendo existir sensibilidades individuales considerablemente mayores.

Para sustancias sin un valor de IDLH publicado, la EPA (10) ha definido los valores EAEC, como las concentraciones en aire que, de alcanzarse, dan origen a situaciones de emergencia (*Emergency Airborne Exposure Concentration Levels*). Los valores EAEC pueden estimarse dependiendo de los datos disponibles como $0,1 \times LC_{50}$, $0,01 \times LD_{50}$, LC_{10} ó $0,1 \times LD_{10}$, donde LC₅₀ y LD₅₀ tienen los significados ya explicados, y los valores LC₁₀ y LD₁₀ serían, respectivamente, la mínima concentración y la mínima dosis que se consideran capaces de producir la muerte en algún individuo de la población. Si un valor EAEC se obtiene de datos LD₅₀ o LD₁₀, que representan dosis específicas (mg/kg), es necesario convertir la dosis específica en una concentración en aire para una exposición estándar (treinta minutos). En este caso, para una persona de 70 kg que inhale aproximadamente 400 litros de aire en treinta minutos tenemos que

$$EAEC \text{ (mg/m}^3\text{)} = \frac{EAEC \text{ (mg/kg) (70 kg)}}{0,4 \text{ m}^3} \quad [5.4]$$

En cuanto a la existencia cotidiana de sustancias tóxicas en el ambiente laboral, la ACGIH («American Conference of Governmental Industrial Hygienists») publica periódicamente los «valores límite um-

bral», TLV (*Threshold limit values*) para una serie de sustancias, basándose en datos experimentales con animales de laboratorio y con personas, así como en la experiencia industrial. Los valores TLV se refieren a concentraciones de una sustancia determinada en aire, y corresponden a condiciones a las cuales se considera que un trabajador normal puede ser expuesto sin sufrir efectos adversos. Hay varios tipos de valores TLV: el valor TLV promediado en el tiempo (TLV-TWA) es la concentración media ponderada para una jornada laboral de ocho horas (cuarenta horas semanales), a la cual la mayoría de los trabajadores pueden ser expuestos durante toda su vida laboral sin sufrir efectos adversos. El valor TLV para una exposición de corta duración (TLV-STEL) es la máxima concentración a la que la mayoría de los trabajadores pueden exponerse por un período continuado de hasta quince minutos sin sufrir: *i*) irritaciones, *ii*) cambios crónicos o irreversibles en los tejidos o *iii*) narcosis que reduzca su eficacia, les predisponga al accidente o dificulte las reacciones de defensa. Las exposiciones no deben superar los quince minutos, no deben repetirse más de cuatro veces diarias y deben producirse con al menos una hora de intervalo, todo ello sin superar el valor TLV-TWA para la jornada laboral. Por último, un tercer valor TLV es el TLV-C, o valor «techo» (*Ceiling limit*), que es la concentración que no debe rebasarse, ni siquiera instantáneamente. La legislación española establece valores CMP, o concentración máxima permisible en el ambiente laboral (ver Reglamento de actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas, Decreto 2414/1961), que siguen la pauta de los valores TLV.

El uso de valores TLV requiere tener en cuenta ciertas consideraciones que se detallan en la declaración de principios para el uso de los valores TLV que publica la ACGIH junto con los valores mismos. Así, los distintos tipos de valores TLV no deben considerarse como una frontera definida entre concentraciones seguras e inseguras, ni como un índice relativo de toxicidad de sustancias diferentes. Tampoco deben extrapolarse a estudios fuera del ámbito de la higiene industrial (como, por ejemplo, contaminación atmosférica), o aplicarse a exposiciones continuas en el tiempo. En el caso de exposiciones distintas de ocho horas diarias o de cuarenta horas semanales, o cuando concurren varias sustancias tóxicas (aunque no existan efectos sinérgicos), los valores TLV publicados deben corregirse. Finalmente, el hecho de que una sustancia no se encuentre en la lista de valores TLV no es necesariamente indicación de baja toxicidad.

Una escala análoga a la de los valores TLV es la de «valores PEL» (*Permissible exposure level*), también basados en exposiciones de ocho

horas y publicados por la OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*). Los valores TLV suelen ser más conservadores que los PEL, aunque en muchos casos coinciden. Existen otras muchas categorías de indicadores de toxicidad (ERPG, TXDS, EEGI, SPEGL, etcétera), cuya descripción sería demasiado extensa para su inclusión en este libro, y se remite al lector a textos de Higiene Industrial para la búsqueda de las definiciones y modos de empleo, así como para profundizar en los expuestos anteriormente. En la tabla 5.1 se relacionan valores TLV y valores IDLH para algunas sustancias seleccionadas.

Tabla 5.1. Valores TLV-TWA, TLV-STEL e IDLH para sustancias seleccionadas. (Tomados de las referencias 21, 22 y 23.)

Sustancia	TLV-TWA (21), (22) (ppm)	TLV-STEL (21), (22) (ppm)	IDLH (23) (ppm)
Acetona	750	1.000	20.000
Ácido acético	10	15	1.000
Ácido nítrico	2	4	100
Alcohol n-butílico (d)	50 (C)	—	8.000
Alcohol sec-butílico	100	—	—
Alcohol ter-butílico	100	150	—
Alcohol etílico	1.000	—	—
Alcohol metílico (d)	200	250	25.000
Alcohol n-propílico (d)	200	250	4.000
Amoníaco	25	35	500
Benceno (d)	10 (0,1*)	—	—
Bromo	0,1	0,3	10
Butilamina (d)	5 (C)	—	2.000
Ciclohexano	300	—	10.000
Ciclohexanol (d)	50	—	3.500
Ciclohexanona (d)	25	—	5.000
Cloro	0,5	1	30
Cloroformo	10	—	—
Cloruro de hidrógeno	5 (C)	—	100
Cresol (mezcla de isómeros) (d)	5	—	250
Crotonaldehído	2	—	400
Cumeno (d)	50	—	8.000
Dióxido de azufre	2	5	100
Dióxido de carbono	5.000	30.000	50.000
Dióxido de nitrógeno	3	5	50

Tabla 5.1. (Continuación)

Sustancia	TLV-TWA (21), (22) (ppm)	TLV-STEL (21), (22) (ppm)	IDLH (23) (ppm)
Estireno (monómero) (d)	50	100	5.000
Etilbenceno	100	125	2.000
Etilendiamina	10	—	2.000
Etilenglicol	50 (C)	—	—
Fenol (d)	5	—	250
Flúor	1	2	25
Fosgeno	0,1	—	2
Furfural (d)	2	—	250
Hidracina (d)	0,1 (0,01*)	—	—
Isocianato de metilo (d)	0,02	—	20
Monóxido de carbono	50 (25*)	400	1.500
Nitrobenceno (d)	1	—	200
Nitrotolueno (d)	2	—	200
Óxido de etileno	1	—	—
Óxido nítrico	25	—	100
Piridina	5	—	3.600
Sulfuro de hidrógeno	10	15	300
Tetracloruro de carbono (d)	5	—	—
Tetrahidrofurano	200	250	20.000
Tolueno	100 (50*)	150	2.000
Tolueno 2,4 disocianato (TDI)	0,005	0,02	10
Xileno	100	150	10.000

NOTAS:

- El uso correcto de los valores TLV requiere consultar los principios de uso elaborados por la ACGIH.
- Para convertir valores en partes por millón (ppm) a miligramos por metro cúbico (suponiendo como condiciones una presión de 760 mm de mercurio y una temperatura de 25° C), la expresión a utilizar es:

$$TVL \text{ (mg/m}^3\text{)} = \frac{PM \text{ (g)} \times TLV \text{ (ppm)}}{24,45}$$

(C) indica valor «techo».

(d) indica absorción por vía dérmica.

(*) indica valor que se consigna en la propuesta de modificación para 1991-92.

Ecuaciones Probit de vulnerabilidad a las emisiones tóxicas

Cuando se aplican expresiones Probit como la ecuación [5.3] a la evaluación de vulnerabilidad frente a sustancias tóxicas, la intensidad

del factor causante V ha de tener en cuenta tanto la concentración como el tiempo de exposición, y en consecuencia adopta la forma $C^n t$, con lo que la ecuación [5.3] puede escribirse como

$$Y = k_1 + k_2 \ln[C^n t] \quad [5.5]$$

donde n es un exponente con un valor entre 0,6 y 3, que se determina empíricamente, la concentración C se expresa en partes por millón, y el tiempo t , en minutos. La ecuación anterior, tras sustitución de los valores apropiados de los parámetros, proporciona directamente el valor de Y en el caso de que la exposición sea de características constantes (emisión continua, concentración invariante en el tiempo para una posición determinada). Para el caso de emisiones de características variables con el tiempo (por ejemplo, emisiones instantáneas), la concentración percibida por el receptor varía con el tiempo, por lo que el término $C^n t$ de la ecuación anterior debe sustituirse por la correspondiente integral, extendida al tiempo de duración de la emisión desde el punto de vista del receptor (t_{exp}):

$$Y = k_1 + k_2 \ln\left(\int_0^{t_{exp}} C^n dt\right) \quad [5.5b]$$

Como se ha indicado, los valores de k_1 , k_2 y n se determinan empíricamente. La principal fuente de datos son los experimentos sobre animales de laboratorio, aunque también existen algunos datos históricos de accidentes en los que se conocen con cierta precisión las características del accidente y los efectos producidos. En este caso, dado el escenario del accidente (cantidad o caudal emitido, tipo de la emisión, condiciones meteorológicas, etc.), el uso de modelos análogos a los descritos en el capítulo anterior permite estimar los datos relevantes concentración-tiempo para un sujeto determinado, y relacionar éstos con los efectos sufridos.

Sea cual sea la procedencia de los datos utilizados, para obtener los valores de los parámetros de la ecuación [5.5] se requiere un ajuste estadístico de los mismos, como se ha visto en el ejemplo 5.1. En vista de la escasez de datos, a menudo los parámetros tienen altas incertidumbres asociadas, y en todo caso es posible que dos conjuntos distintos de parámetros proporcionen ajustes estadísticos de similar calidad para el mismo conjunto de datos. En la tabla 5.2 se reseñan los valores de los parámetros de ecuaciones Probit para varias sustancias tóxicas. En el

Tabla 5.2. Valores de los parámetros de la ecuación [5.5] para mortalidad ocasionada por distintas sustancias tóxicas. (Seleccionados a partir de las referencias 2 y 12.)

Sustancia	k_1	k_2	n
Acroleína	-9,931	2,049	1
Acrilonitrilo	-29,42	3,008	1,43
Amoníaco	-35,9	1,85	2
	-30,57	1,385	2,75
Benceno	-109,78	5,3	2
Bromo	-9,04	0,92	2
Cianuro de hidrógeno	-29,42	3,008	1,43
Cloro	-8,29	0,92	2
	-17,1	1,69	2,75
Cloruro de hidrógeno	-16,85	2,00	1,00
Dióxido de azufre	-15,67	2,10	1,00
Dióxido de nitrógeno	-13,79	1,4	2
Fluoruro de hidrógeno	-35,87	3,354	1,00
Formaldehído	-12,24	1,3	2
Fosgeno	-19,27	3,686	1
Isocianato de metilo	-5,642	1,637	0,653
Monóxido de carbono	-37,98	3,7	1
Sulfuro de hidrógeno	-31,42	3,008	1,43
Tolueno	-6,794	0,408	2,50

caso del cloro y del amoníaco aparecen dos conjuntos de parámetros, procedentes de distintas fuentes. Las estimaciones de porcentajes de población afectados utilizando uno u otro conjunto de valores pueden llegar a diferir considerablemente, lo que indica la dificultad de obtener estimaciones precisas de vulnerabilidad. Por ello, a la hora de cuantificar la vulnerabilidad en un análisis de riesgos en el que se examina un escenario hipotético, en ocasiones puede ser preferible obviar el uso de ecuaciones Probit y simplemente calcular los valores concentración-tiempo para las poblaciones expuestas. De esta manera, las concentraciones experimentadas por éstas pueden relacionarse con alguno de los valores de referencia anteriormente indicados, con lo que el análisis puede dirigirse a considerar la probabilidad de que se rebasen valores TLV-C, IDLH, LC₁₀, etc.

Vulnerabilidad a los efectos térmicos

La radiación térmica procedente de un incendio puede causar efectos adversos tanto en personas como en instalaciones. De una manera directa, los sujetos expuestos pueden sufrir quemaduras de diverso grado, con resultado de muerte a partir de ciertos valores de la intensidad de la radiación recibida y del tiempo de exposición. Por otro lado, los efectos térmicos pueden afectar a edificios o instalaciones, debilitando sus estructuras y destruyéndolos total o parcialmente, lo que a su vez puede dar origen a muerte o heridas en individuos no expuestos directamente a la radiación. Otro caso que ocurre con cierta frecuencia es que un incendio en una instalación determinada se extienda a otras que inicialmente no estaban afectadas (efecto dominó), lo que puede llevar consigo unas consecuencias finales muy por encima de las que cabría esperar, considerando aisladamente la instalación en la que se origina el accidente.

Como es lógico, en la industria química pueden tener lugar incendios ordinarios, cuyos orígenes no están relacionados con la actividad específica de la industria. Así, una instalación eléctrica en mal estado puede dar lugar a un incendio en un edificio de oficinas dentro de una empresa química, de la misma manera que ocurriría fuera de la instalación industrial. Tales incendios son comunes a cualquier otra rama de actividad, y no se consideran en este texto, excepto en el caso de que puedan extenderse, dando origen a incendios y explosiones en las instalaciones industriales. Aquí nos ocuparemos de los efectos de incendios industriales, como un incendio de líquido en charco, un incendio flash o la esfera de fuego que resulta de un BLEVE.

La estimación de la vulnerabilidad a la radiación térmica dentro de este contexto implica la aplicación de los modelos previos descritos en el capítulo 3. Conocido el tipo de incendio y sus características, estos modelos permiten estimar la duración del mismo y la intensidad emitida en función del tiempo, lo que proporciona la base necesaria para la realización de cálculos de vulnerabilidad.

Efectos de la radiación térmica en personas

Los efectos de la radiación térmica sobre personas dependen fuertemente del tipo de accidente involucrado. Así, en un incendio de líqui-

do en charco, por lo general, las personas expuestas a niveles peligrosos de radiación reaccionan a tiempo, buscando refugio o escapando. En este caso, a medida que las víctimas potenciales se alejan del foco emisor, la radiación recibida disminuye, por lo que en un cálculo riguroso de vulnerabilidad habría que introducir una función que considere el decrecimiento de la radiación recibida con el tiempo. Por el contrario, en un incendio flash la posibilidad de reacciones individuales de protección disminuye, debido al corto tiempo de respuesta.

Evidentemente, la variabilidad del comportamiento personal introduce un elemento adicional de incertidumbre en la estimación de vulnerabilidad humana para un escenario dado. King (8) cita un incendio flash en la refinería de Abadan causado por una nube de hidrocarburos procedente de un escape. Parte de los trabajadores, al darse cuenta del peligro, huyeron en la dirección correcta, mientras que otro grupo eligió una ruta de escape en la dirección del viento y fue envuelto por la nube, que se inflamó, causando la muerte de la mayoría. Otro factor de gran influencia en los efectos finales de un nivel de radiación determinado es el grado de cubrimiento de la piel, que varía considerablemente con la época del año. Sin embargo, en el análisis de riesgos es frecuente considerar la piel desnuda para situarse en el caso más conservador, ya que en todo caso es probable que haya partes del cuerpo (la cara, cuello, manos, etc.) directamente expuestas a la radiación.

La gravedad de una quemadura depende principalmente de la cantidad de tejido destruido y de la extensión de superficie corporal afectada. Otros factores (edad, localización de la quemadura, severidad de las heridas asociadas) también afectan a la capacidad de recuperación tras una quemadura. La piel consta de dos capas, la externa o epidermis, que constituye una barrera ante microorganismos y otros agentes adversos, y la capa interna o dermis, donde se encuentran la mayor parte de las células vivas, que consiste en tejidos fibrosos interconectados, que son los que impiden la evaporación de los fluidos corporales. Embebidas en la dermis y abriéndose paso hasta la superficie de la piel están las glándulas sudoríparas, responsables de la transpiración que ayuda a regular la temperatura corporal, así como los vasos sanguíneos y los nervios, incluyendo las terminaciones nerviosas que transmiten sensaciones de tacto, presión, calor, frío y dolor. La piel también es responsable de la formación de vitamina D. Como es lógico, la destrucción de la piel por quemaduras puede alterar o interrumpir todas las funciones anteriores, con las complicaciones consiguientes.

De acuerdo con la profundidad del daño causado en la piel, las quemaduras se clasifican en cuatro grados. En las quemaduras de primer grado sólo queda afectada la epidermis, produciéndose enrojecimiento y algo de dolor. No hay ampollas y el edema es mínimo. Las quemaduras de primer grado sanan sin cicatriz en dos o tres días. Un ejemplo lo constituyen las quemaduras solares moderadas. Por el contrario, las quemaduras de segundo grado atraviesan la epidermis y parte de la dermis. Se producen ampollas, de tanto mayor persistencia cuanto mayor sea la profundidad, y pueden ser muy dolorosas. Si no hay infección, una quemadura de segundo grado superficial sana en unas dos semanas. Sin embargo, las quemaduras profundas de segundo grado pueden llegar a requerir períodos de recuperación de uno a tres meses, causando pérdidas importantes de fluido corporal y alteraciones metabólicas.

En las quemaduras de tercer grado (y en algunas quemaduras profundas de segundo grado, que son difíciles de distinguir de éstas) queda afectada la dermis en toda su profundidad. No suele haber sensación de dolor porque las terminaciones nerviosas que la transmiten han sido destruidas, junto con los vasos sanguíneos, glándulas sudoríparas, glándulas sebáceas, folículos capilares, etc. Producen grandes pérdidas de fluidos y alteraciones metabólicas graves. Finalmente, suelen denominarse quemaduras a cuarto grado a aquellas que llegan más allá de la dermis, afectando músculos y huesos. Pueden ocurrir si parte del cuerpo queda atrapada en las llamas y no se retira inmediatamente, y también se dan con cierta frecuencia en quemaduras eléctricas. En estas quemaduras tan profundas pueden entrar materiales tóxicos directamente en el torrente sanguíneo. A menudo llevan consigo amputaciones de las partes afectadas, y en cualquier caso representan una situación muy grave para el individuo afectado.

A menudo, el grado de destrucción de los órganos de la dermis viene determinado por la rapidez de la respuesta de protección que se produce cuando la intensidad de la radiación recibida sobrepasa un cierto nivel. Para que esta respuesta tenga lugar, tiene que transmitirse un flujo de calor suficiente a través de la piel, hasta alcanzar las terminaciones nerviosas adecuadas. Si la dosis térmica recibida (función de la intensidad de radiación y del tiempo de exposición) es lo suficientemente elevada, se alcanza el umbral de dolor, lo que activa el mecanismo de protección, dando origen a actos automáticos, así como a respuestas conscientes. Existe evidencia experimental que sitúa el umbral de dolor en el momento en que se alcanza una temperatura de 45° C a una

profundidad de 0,1 mm bajo la superficie externa de la piel. A partir de aquí la formación de ampollas ocurre rápidamente, al llegar la temperatura a los 55° C (12). El tiempo necesario para alcanzar el umbral de dolor disminuye a medida que aumenta la intensidad de la radiación recibida, como se muestra en la figura 5.4. Así, para una radiación de 500 Btu/h ft² (1,74 kW/m²), el umbral de dolor se alcanza en aproximadamente un minuto, mientras que si triplicamos esta intensidad, el tiempo necesario se reduce a dieciséis segundos. Como elemento de comparación, la intensidad de radiación que recibimos procedente del sol puede estimarse en torno a 1 kW/m², y niveles de radiación equivalentes a 1,6 kW/m² pueden tolerarse sin sensación de incomodidad durante períodos de tiempo relativamente prolongados (12).

Como se ha indicado, las quemaduras aparecen rápidamente tras alcanzarse el umbral de dolor. Por ejemplo, a un nivel de radiación de

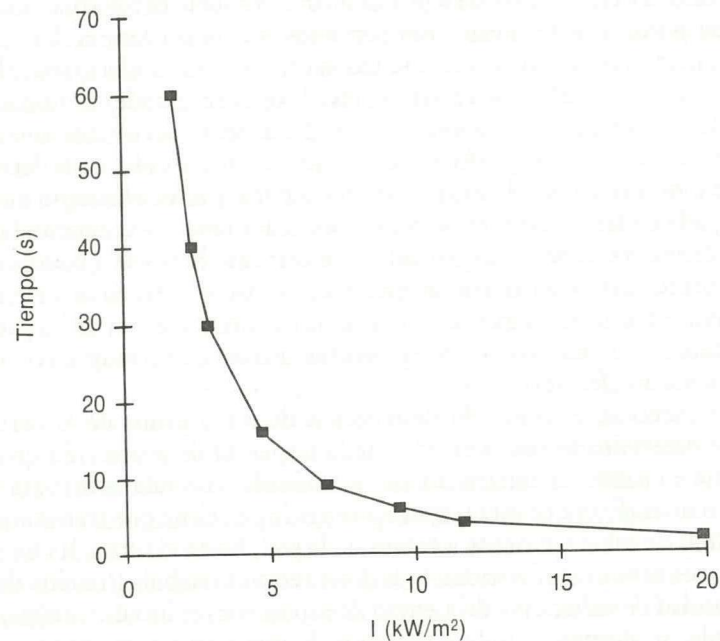


Figura 5.4. Tiempo de exposición necesario para alcanzar el umbral de dolor. (Representado a partir de datos de la referencia 12.)

9,5 kW/m² se alcanza el umbral de dolor en aproximadamente ocho segundos, y si prosigue la exposición a la radiación con la misma intensidad pueden producirse quemaduras de segundo grado en unos veinte segundos (12). De manera análoga, pequeñas diferencias en intensidad de radiación o en tiempo de exposición dan origen a grandes variaciones en los efectos finales. Así, de los datos de Eisenberg y cols. (3), se desprende que con una exposición de 1,43 segundos de duración y una intensidad de radiación de 131 kW/m² se alcanzan quemaduras de segundo grado. Si la intensidad de radiación aumenta hasta 146 kW/m² (un 11 por 100 de variación), se alcanza el umbral de mortalidad. Por otro lado, un nivel de radiación inferior, de unos 128 kW/m², produciría un 100 por 100 de mortalidad si la exposición se prolonga hasta 10,1 segundos.

Las expresiones Probit para la predicción de mortalidad por causa de la radiación térmica recibida de incendios de líquido en charco e incendios flash utilizan un valor de la intensidad del factor causante V , proporcional al producto del tiempo de exposición por la intensidad de radiación recibida elevada al exponente 4/3. La expresión habitualmente utilizada es la propuesta por Eisenberg y cols. (3):

$$Y = -14,9 + 2,56 \ln(10^{-4} I^{4/3} t) \quad [5.6]$$

donde la intensidad de la radiación recibida, I , tiene unidades de W/m² y el tiempo de exposición t viene dado en segundos. Los mismos autores establecieron criterios para quemaduras no letales. Así, se supone la aparición de quemaduras de primer grado si el producto $tI^{1,15}$ rebasa un cierto valor. La expresión a aplicar es

$$tI^{1,15} > 550.000 \quad [5.7]$$

Ejemplo 5.2:

Considerando las características del incendio de líquido en charco de 20 m de diámetro descrito en el ejemplo 3.8, estimar el tiempo al que se producirá un 1 por 100 (umbral de mortalidad) y un 50 por 100 de bajas humanas, respectivamente.

En el ejemplo 3.8 se calcula la intensidad de radiación sobre una superficie vertical situada a 40 m del centro de un incendio circular de líquido en charco (a 30 m de la superficie de las

Ejemplo 5.2 (continuación):

llamas). La radiación recibida a esa distancia es de $18,4 \text{ kW/m}^2$. Si suponemos a una persona situada a esta distancia, su vulnerabilidad viene dada por la ecuación [5.6]:

$$Y = -14,9 + 2,56 \ln(10^{-4} (18.400)^{4/3} t)$$

Para un 1 por 100 de afectados $Y = 2,67$, por lo que de la ecuación anterior se obtiene $t = 19,7$ segundos. Análogamente, para el 50 por 100 de mortandad $Y = 5,0$ y $t = 48,9$ segundos. Hay que tener en cuenta que en este caso los tiempos involucrados son relativamente largos, por lo que no es realista suponer que los sujetos afectados permanecen recibiendo el mismo nivel de radiación durante el tiempo de exposición. Por el contrario, hay que contar con reacciones de autoprotección (alejamiento del incendio, búsqueda de cobijo, cubrimiento de las zonas más sensibles), que disminuyen de manera importante el nivel de radiación recibida y sus efectos. Sin embargo, también cabe considerar el caso de personas con incapacidad física para moverse (desmayos, heridas, etc.), o atrapadas sin posibilidad de huida, que sí estarían sujetas al escenario descrito.

Efectos de la radiación térmica en edificios y estructuras

Los efectos de la radiación térmica son obviamente diferentes para estructuras de distinta naturaleza. La incidencia de la radiación térmica sobre estructuras combustibles puede causar la ignición y combustión de las mismas. Por el contrario, en materiales no combustibles, como, por ejemplo, determinadas estructuras metálicas, el efecto más peligroso de la incidencia de la radiación es el de rebajar la resistencia del material, con el consiguiente riesgo de colapso de la estructura. A este respecto, la incidencia directa de la llama es más peligrosa que la radiación térmica sin contacto con la estructura.

A la hora de evaluar el daño a edificios y estructuras, es muy importante determinar si ocurre la ignición del material considerado. A este respecto, es de notar que los tratamientos superficiales de los distintos materiales pueden modificar fuertemente sus características de ignición.

La madera suele tomarse como sólido combustible de referencia en estudios de ignición por radiación térmica. Lees (2) cita el trabajo de Lawson y Simms (14), en el que estos autores investigan la ignición de madera con y sin llama piloto (a media pulgada de la superficie de la madera). Obtienen un criterio de ignición basado en dos condiciones: para que ocurra ignición sin la presencia de una llama piloto, es decir, ignición causada por la radiación procedente de una fuente no contigua al material en estudio, la intensidad de la radiación recibida debe superar el valor de 25.400 W/m^2 , y debe además cumplirse que

$$(I - 25.400) t^{4/5} > 6.730 \quad [5.8]$$

donde la intensidad se expresa en W/m^2 y el tiempo en segundos. Dado un valor de la intensidad de radiación recibida superior al valor crítico, la ecuación [5.8] permite calcular el tiempo mínimo necesario para que se produzca la ignición. Esta expresión puede utilizarse, por ejemplo, en el caso de radiación procedente de un incendio de líquido en charco. En el caso de ignición con llama piloto, la intensidad umbral es de 13.400 W/m^2 , y la expresión correspondiente es

$$(I - 13.400) t^{2/3} > 8.050 \quad [5.9]$$

Es apropiado utilizar la fórmula para ignición con llama piloto en el caso de incendio flash (3). Para cuerpos distintos de la madera pueden obtenerse expresiones similares, donde se relacione una intensidad crítica y un tiempo mínimo para ignición. En el caso de que no se encuentren datos disponibles lo adecuado es realizar un balance de calor en el que se tenga en cuenta la cantidad de energía recibida por radiación y la que el cuerpo puede disipar por convección y conducción. Conocidas las características del objeto, puede calcularse la temperatura alcanzada en función del tiempo, y compararla con los valores compatibles con la integridad física del material. Otras veces se establece un valor umbral a partir del cual son posibles daños de consideración en determinadas estructuras. Así, 37.500 W/m^2 se ha citado como valor de intensidad de radiación suficiente para causar daños en equipo de proceso (12).

Vulnerabilidad a las explosiones

Los métodos expuestos en el capítulo 3 permiten estimar los efectos directos de explosiones, tales como la sobrepresión alcanzada, la duración

de la fase positiva y el impulso, en función de la distancia a las mismas. Por su parte, los modelos de vulnerabilidad permiten relacionar la magnitud física de los efectos producidos con el daño final causado a personas o instalaciones. A consecuencia de las explosiones, las personas pueden sufrir de forma directa diversos daños que van desde la ruptura de tímpano a la muerte por hemorragia pulmonar o por proyección del cuerpo. Los daños indirectos incluyen heridas por fragmentos de cristal y proyectiles, así como muerte provocada por el colapso de edificios y estructuras. Por su parte, los daños estructurales presentan una amplia variación, desde la ruptura de cristales hasta la demolición completa de estructuras, destrucción de instalaciones de proceso y formación de cráteres.

Daños debidos a la sobrepresión

La tabla 5.3 muestra los niveles de daño que cabe esperar para distintos valores de la sobrepresión. Puede observarse que con sobrepresiones relativamente bajas (0,35 bares o 5 psi manométricos) resulta previsible que ocurran daños importantes en edificios, llegando en ocasiones a la demolición completa de los mismos, y a sobrepresiones aún menores (2 psi) puede ocurrir la destrucción parcial de paredes y techumbres, con el consiguiente peligro de bajas humanas. En comparación, la resistencia del organismo a los efectos directos de las explosiones es sorprendentemente alta. El nivel al que ocurre la destrucción parcial de paredes y techos es inferior al umbral para ruptura del tímpano (el 1 por 100 de probabilidad de ruptura del tímpano ocurre a 2,4 psi), y está muy por debajo del umbral de mortalidad por hemorragia pulmonar (14,5 psi). La conclusión es, por tanto, que las bajas humanas ante una explosión son más probables entre la población en el interior de edificios (efectos indirectos) que en la del exterior, que está expuesta a los efectos de la sobrepresión de una manera directa.

Las ecuaciones Probit a utilizar en la evaluación de los efectos directos de una explosión son las siguientes (3): para mortalidad por hemorragia pulmonar.

$$Y = -77,1 + 6,91 \ln P^0 \quad [5.10a]$$

donde P^0 es la sobrepresión (Pa). Análogamente, para ruptura del tímpano la ecuación correspondiente es

Tabla 5.3. Daños producidos por las explosiones en función de la sobrepresión. (Datos seleccionados de las referencias 2, 15 y 24.)

Sobrepresión (psi)	Tipo de daño
0,03	Rotura ocasional de cristales grandes sometidos a tensiones.
0,04	Ruido fuerte. Rotura de cristales por la onda sonora.
0,1	Rotura de cristales pequeños sometidos a tensión.
0,3	Límite de proyectiles. 95 por 100 de probabilidad de no sufrir daños importantes. Daños menores a techos de casas. Rotura del 10 por 100 de los cristales.
0,5-1,0	Destrucción de ventanas, con daño a los marcos.
0,7	Daños estructurales menores en las casas.
1,0	Demolición parcial de casas, que quedan inhabitables.
1-2	Fallo de paneles y mamparas de madera, aluminio, etc.
2	Colapso parcial de paredes y techos de casas.
2-3	Destrucción de paredes de cemento de 20 a 30 cm de grosor.
2,4	Umbral (1 por 100) de ruptura de tímpano.
2,5	Destrucción del 50 por 100 de la obra de ladrillo en edificaciones. Distorsiones en estructuras de acero.
3-4	Ruptura de tanques de almacenamiento.
5-7	Destrucción prácticamente completa de casas.
7	Vuelcan vagones de tren cargados.
7-8	Rotura de paredes de ladrillo de 20 a 30 cm de grosor.
10	Probable destrucción total de edificios. Máquinas pesadas (3.500 kg) desplazadas, y fuertemente dañadas.
12,2	90 por 100 de probabilidad de ruptura de tímpano.
14,5	Umbral (1 por 100) de muerte por hemorragia pulmonar.
25,5	90 por 100 de probabilidad de muerte por hemorragia pulmonar.
280	Formación de cráter.

$$Y = -15,6 + 1,93 \ln P^0 \quad [5.10b]$$

A los efectos anteriores hay que añadir las bajas causadas por los fragmentos de material a alta velocidad que se generen en la explosión, las debidas a impactos por traslación o proyección de todo el cuerpo y las que están relacionadas con otros efectos asociados a la explosión, como colapso de estructuras e incendios o producción de gases tóxicos

en su caso. Para estimar los efectos de los proyectiles generados en la explosión, así como los efectos debidos a la traslación del cuerpo, la variable causativa a utilizar en las expresiones Probit es el impulso I_p (Ns/m²), definido (ecuación [3.19]), como

$$I_p = \int_0^{t_+} P_o(t) dt \quad [5.11]$$

Donde t_+ es la duración de la fase positiva. La ecuación [3.20] proporciona la expresión del impulso en función de los parámetros de la ecuación modificada de Friedlander. Una vez estimado el impulso, las correspondientes ecuaciones Probit son las siguientes:

Para heridas graves a causa de proyectiles, particularmente fragmentos de vidrio,

$$Y = -27,1 + 4,26 \ln I_p \quad [5.12]$$

La onda expansiva también puede producir la traslación de todo el cuerpo, a menudo con proyección a distancias considerables, pudiendo acarrear traumatismo craneal. La ecuación Probit para muerte por traslación de todo el cuerpo es

$$Y = -46,1 + 4,82 \ln I_p \quad [5.13]$$

Y la correspondiente a heridas graves

$$Y = -39,1 + 4,45 \ln I_p \quad [5.14]$$

En cuanto a los efectos de proyectiles sobre las estructuras, en el capítulo 3 se realizaron algunas consideraciones acerca de la estimación de la velocidad y alcance de los fragmentos resultantes de la explosión de un recipiente. Lees (2) revisa algunas ecuaciones empíricas para la penetración de fragmentos en distintos materiales. Estas ecuaciones proporcionan la estimación de la profundidad de la penetración en función del tipo de material que recibe el impacto, y de la forma, masa y velocidad del fragmento. Otro efecto asociado a las explosiones es la producción de una onda que se transmite por el terreno, y cuya amplitud puede ser suficiente como para dañar algunas estructuras. Lees (2) también cita la siguiente ecuación para el cálculo de la amplitud

$$A = 0,001 K \frac{\sqrt{E}}{d} \quad [5.15]$$

donde la amplitud de la perturbación A viene dada en pulgadas, E es la masa de explosivo (lb) y d la distancia (ft). La constante empírica K depende del tipo de terreno, estimándose en 100 para suelo rocoso y 300 para terreno de tipo arcilloso. El umbral de daños correspondería a una amplitud de 0,008 pulgadas para estructuras de resistencia media o 0,003 pulgadas para estructuras débiles. Como elemento de comparación, 0,003 pulgadas corresponde al orden de magnitud de las vibraciones producidas en un tráfico pesado.

Ejemplo 5.3:

Estimar la vulnerabilidad a los efectos de una explosión equivalente a 1.000 kg de TNT a distancias de 60 y 120 metros del origen.

Para calcular la sobrepresión se obtiene la distancia reducida, de acuerdo con la ecuación [3.17], $z = 60/(1.000)^{1/3} = 6 \text{ m.kg}^{-1/3}$. Con este valor de z se obtiene (figura 3.19), una sobrepresión $P_o = 25 \text{ kPa} = 3,6 \text{ psig}$. De manera análoga, para una distancia de 120 metros $z = 12 \text{ m.kg}^{-1/3}$, lo que proporciona una sobrepresión de $8 \text{ kPa} = 1,2 \text{ psig}$. Con estos valores de sobrepresión pueden calcularse los efectos de la explosión. Otros parámetros de la onda de presión se obtienen de la tabla dada en el capítulo 3 (en el apartado «Explosiones no confinadas»), donde aparecen α , t_+ y t_a para las distancias de 60 y 120 metros en explosiones de una tonelada de TNT [para otras distancias habría que interpolar o, preferiblemente, consultar la bibliografía apropiada (2)].

Distancia	t_a	t_+	α
60 m	18	12	1,08
120 m	59	18	0,93

La variación de la sobrepresión con el tiempo para ambas distancias se ha representado (ecuación [3.13]) en la figura 5.5 a

Ejemplo 5.3 (continuación):

partir del instante de llegada de la onda de presión a 60 y 120 m de distancia, respectivamente. Puede observarse la distinta forma de ambas curvas, con un menor valor de P_0 y mayor de t_+ a medida que aumenta la distancia.

i) Efectos a 60 metros del origen:

En la tabla 5.3 puede observarse que para la sobrepresión existente a 60 metros (3,6 psig), los daños a edificios y estructuras son muy importantes. Puede esperarse que se produzcan, entre otros daños, ruptura de algunos tanques de almacenamiento y demolición extensa de edificaciones.

En cuanto a la vulnerabilidad directa de personas, de la ecuación [5.10] se obtiene para muerte por hemorragia pulmonar

$$Y = -77,1 + 6,91 \ln P_0 = -7,1$$

Por tanto no son probables muertes por esta causa, lo que era de esperar, ya que de acuerdo con la tabla 5.3 el umbral de muerte por hemorragia pulmonar se produce a un valor de la sobrepresión igual a 14,5 psi. De manera análoga, para ruptura de tímpano de la ecuación [5.10b] se obtiene $Y = 3,94$. Transformando unidades Probit a porcentajes de probabilidad mediante la figura 5.1 se obtiene un porcentaje de rupturas de tímpano de aproximadamente el 15 por 100 entre la población afectada.

Para calcular el impulso es necesario tener en cuenta la variación de la sobrepresión con el tiempo, según lo indicado en la ecuación [5.11]. Sustituyendo valores en la expresión integrada [3.20], se obtiene $I_p = 107,92 \text{ (kPa)(ms)} = 107,92 \text{ Ns/m}^2$. A partir de las ecuaciones [5.12] a [5.14] puede estimarse que no son de esperar heridas graves ni muertes debido a la formación de proyectiles ni por traslación del cuerpo. A este respecto, cabe citar los datos de Eisenberg y cols. (3), que sitúan el umbral de heridas de consideración en un impulso de $148,4 \text{ Ns/m}^2$, aunque el umbral para laceración de la piel sería inferior ($74,1 \text{ Ns/m}^2$).

Ejemplo 5.3 (continuación):*ii) Efectos a 120 metros del origen:*

Con una sobrepresión de 8 kPa (1,2 psi) son de esperar la rotura de cristales y ventanas, así como daños a viviendas, algunas de las cuales quedarían inutilizables (ver tabla 5.3). La aplicación de las ecuaciones anteriores muestra que no es previsible la ruptura de tímpano, y muchos menos la muerte por hemorragia pulmonar, traslación del cuerpo, etc., que podían descartarse incluso a 60 m.

Tanto a 60 como a 120 m la causa más probable de muerte de personas son los efectos indirectos (personas dentro de edificios que son demolidos por la explosión), antes que las causas directas.

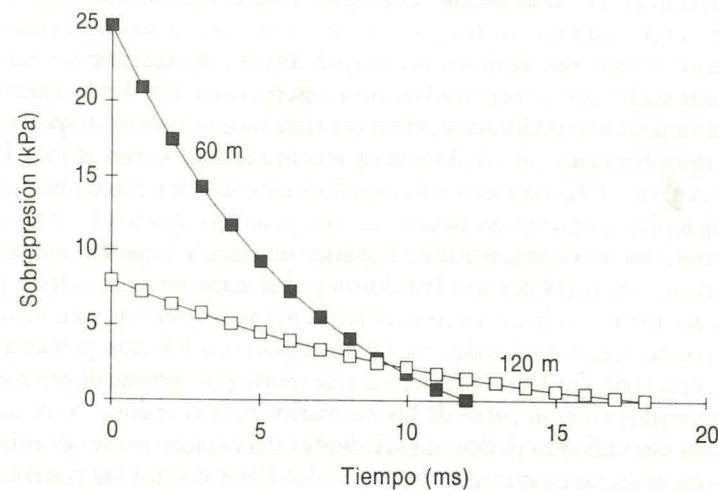


Figura 5.5. Variación de la sobrepresión con el tiempo a 60 y 120 m del centro de la explosión en el ejemplo 5.3.

Factores que modifican la vulnerabilidad de personas e instalaciones

Tras un accidente, si se aplican los modelos de efectos descritos anteriormente a las circunstancias en las que el accidente ha tenido lugar, es frecuente que las consecuencias finales reales, expresadas en términos de bajas humanas o de daños a la propiedad, sean inferiores a las previstas. Por el contrario, existen ejemplos de accidentes donde los efectos han sobrepasado las previsiones razonables. En los casos en los que los efectos finales son de menor magnitud que los previstos, una posible causa puede ser el carácter conservador de las suposiciones que se realizan al aplicar algunos modelos, así como de algunas de las correlaciones empíricas utilizadas. En otros casos interviene el azar, con efectos que pueden ser beneficiosos o perjudiciales. Finalmente, hay casos en que los servicios de emergencia (evacuación, lucha contra incendios, atención a los heridos, etc.) funcionan con gran efectividad y las consecuencias del accidente pueden mitigarse considerablemente.

En cualquier caso, es preciso definir claramente el escenario (es decir, las características del accidente y las circunstancias concomitantes) para el cual se realiza el análisis de riesgos. Puesto que los medios humanos y materiales, así como el tiempo disponible para el análisis son limitados, resulta imprescindible restringir el número de casos a analizar, concentrándose en los que revisten un mayor interés, ya sea por su mayor probabilidad o por la magnitud de sus consecuencias, etc. En la selección de las características del accidente a estudiar juega un papel importante el análisis histórico de accidentes, que proporciona, como se ha visto en el capítulo 2, las pautas y los tipos de accidentes más frecuentes. Así, por ejemplo, al realizar un análisis del riesgo de transporte de sustancias peligrosas por ferrocarril, el análisis histórico muestra (17) que los escenarios dominantes de accidente son la colisión y el descarrilamiento. Otros posibles accidentes (fallo de los contenedores por fatiga del material, fuentes externas de fuego, explosión, etc.) constituyen una fracción pequeña de la frecuencia de accidentes relativos al transporte por ferrocarril, y pueden ser ignorados en gran parte de los escenarios para el análisis de riesgos.

Una vez definido el tipo de accidente, sus características propias y las circunstancias en que tiene lugar pueden hacer que los efectos finales en cuanto a vulnerabilidad de personas e instalaciones varíen en varios órdenes de magnitud. Entre los factores con una mayor influencia están los siguientes:

— Localización: Es muy importante de cara a determinar quiénes son los potenciales receptores (qué personas o qué instalaciones) de los efectos del accidente. Entran en juego factores como la ubicación del accidente relativa a otras instalaciones en la planta, personal en las proximidades, la cercanía de poblaciones externas, la cercanía de bienes externos como edificios, cultivos o vías públicas, etc.

— Condiciones meteorológicas: Temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, lluvia, etc., que pueden agravar o atenuar considerablemente los efectos del accidente.

— Hora: Parece claro que los efectos serán distintos de día o de noche, en horario de trabajo o de descanso. La distribución de la población en el exterior de los edificios también varía de manera importante a lo largo del día.

— Época del año: De gran influencia para determinar el grado de exposición de la población. Así, como se ha señalado anteriormente, el cubrimiento de la piel varía considerablemente a lo largo del año, y también lo hace la densidad de población (por ejemplo, suele haber fuertes variaciones en períodos vacacionales), la cantidad de personas en el interior de edificios, etc.

— Cadenas de evolución: Posibilidad de que queden afectadas otras unidades, dando origen a efectos dominó que agraven las consecuencias del accidente.

— Otros factores: Entre los que cabe señalar la actuación de los sistemas de protección y de los servicios de emergencia, las comunicaciones, la capacidad de evacuación y el entrenamiento para emergencias de la población que pueda ser afectada, etc. Las acciones evasivas (evacuación, escape, refugio) tienen una gran importancia de cara a la reducción de los efectos finales en muchos tipos de accidentes y, por lo tanto, se tratan con algo más de extensión en la sección siguiente y en el capítulo 9, que trata sobre planificación de emergencias.

Acciones evasivas

En ciertos tipos de accidentes, la duración total del fenómeno es tan corta que no hay posibilidad de reacción y, por lo tanto, no tiene sentido hablar de acciones evasivas. Tal es el caso de los incendios flash, o de la mayoría de las explosiones (quedarían excluidas aquellas en las que se conoce con antelación que existe una probabilidad elevada de

explosión, como es el caso de un incendio en un parque de almacenamiento de gas inflamable, en cuyo caso existe el intervalo de tiempo suficiente para iniciar la evacuación). Por el contrario, en otros tipos de accidente, tales como las emisiones tóxicas, el fenómeno puede ser lo suficientemente prolongado como para considerar la posibilidad de acciones evasivas. Éstas pueden consistir en la fuga desordenada, la evacuación o el refugio de los individuos afectados, entendiendo refugio en un sentido amplio que comprende cualquier tipo de protección *in situ* ante los efectos del accidente, desde resguardarse de los efectos térmicos de un incendio tras una pared hasta el uso de equipo protector ante una emisión tóxica.

El lugar adecuado para refugiarse depende del tipo de incidente. Así, el personal en el interior de edificios, por lo general, está más resguardado de incendios y emisiones tóxicas (externas al edificio) que los que se encuentran en el exterior, aunque cabe señalar que el uso de aire acondicionado o ventilación forzada puede llegar a anular la protección contra una emisión tóxica. En cuanto a las explosiones, los edificios son más vulnerables que el cuerpo humano, por lo que en caso de explosiones las bajas en el interior de edificios son con frecuencia mayores que en el exterior, debido a la posibilidad de colapso de la estructura. Asimismo, aunque un edificio puede proteger de los proyectiles primarios formados en una explosión, el personal refugiado en el mismo puede sufrir la acción de proyectiles secundarios, generados por el propio edificio.

A menudo en los modelos de vulnerabilidad a las emisiones tóxicas se incluye una corrección por la evacuación o refugio del personal expuesto. A este respecto es necesario distinguir entre distintos tipos de emisiones. En muchos casos, las características físicas de la emisión (olor, color, etc.) no permiten una detección inmediata, y sólo se produce el aviso del escape cuando sus efectos son evidentes. Como es lógico, esto reduce el tiempo disponible para la evacuación, y a menudo la imposibilita. En otros casos, aunque la emisión vaya acompañada de olor, sus efectos son tóxicos desde muy bajas concentraciones, por lo que el aviso llega demasiado tarde. Tampoco suele ser evidente la dirección de propagación de una nube tóxica, por lo que la ruta de escape seleccionada por un individuo aislado en un momento de peligro puede conducirlo directamente hacia mayores concentraciones. Por último, aunque como se ha indicado, los edificios proporcionan en principio alguna protección contra emisiones tóxicas disminuyendo la con-

centración en el interior, hay que tener en cuenta que también retienen la sustancia tóxica durante más tiempo, después que la nube externa se haya dispersado, por lo que la integral concentración-tiempo puede alcanzar valores considerables.

Con las salvedades anteriores, los modelos de evacuación permiten a menudo corregir las predicciones teóricas, de manera que los resultados de las simulaciones sean más ajustados a la realidad. Un modelo sencillo de evacuación es el siguiente (2):

$$\phi(t) = 1 \quad \text{Para } t < t_D \quad [5.16a]$$

$$\phi(t) = \phi(t_\infty) + [1 - \phi(t_\infty)] \exp [-\lambda (t - t_D)] \quad \text{Para } t \geq t_D \quad [5.16b]$$

donde t_D es el intervalo de tiempo que transcurre hasta que comienza la evacuación, $\phi(t)$ es la fracción de población que no ha sido evacuada a tiempo t , y $\phi(t_\infty)$ es la fracción de población que es imposible evacuar. La constante λ está relacionada con la vida media del proceso de evacuación

$$\lambda = \frac{0,693}{t_{1/2}} \quad [5.17]$$

El modelo anterior no tiene en cuenta factores de indudable importancia, como el área a evacuar y la densidad de población. Un modelo que tiene en cuenta estos factores es el de Prugh (18), que proporciona una correlación que permite calcular el fallo de evacuación (porcentaje de población que no puede ser evacuada), en función del tiempo transcurrido desde que se produce la alarma, utilizando como parámetro una función de la densidad de población y el área a evacuar.

Cuestiones y problemas

5.1. Considerar las tareas domésticas que desarrollamos en casa. ¿A qué tóxicos podemos estar expuestos? ¿En qué tipo de actividades? ¿Cuáles son las rutas de entrada al organismo?

5.2. Rehacer los cálculos del ejemplo resuelto 5.2 considerando que las personas afectadas se alejan del incendio con una velocidad de 2 m/s.

5.3. La población de una isla pequeña se ve afectada durante dos horas por una concentración promedio de 30 ppm de cloro. Calcular el porcentaje de muertes entre la población. Discutir en qué circunstancias (hora, clima, época del año, etc.), el número de afectados podría aumentar o disminuir de forma considerable.

5.4. Modificar los cálculos del ejemplo anterior si la isla tiene una población de 500 personas y se dispone de un barco capaz de evacuar a 100 personas en cada viaje, sabiendo que el tiempo hasta llegar a una isla segura y volver es de treinta minutos. El tiempo hasta que puede comenzar la evacuación (t_D) es de diez minutos.

5.5. Estimar la vulnerabilidad a los efectos tóxicos de las personas que se encuentran a 80 m de distancia de un contenedor de amoníaco que hace explosión, liberando instantáneamente 50 kg en fase vapor. La velocidad del viento es de 6 m/s y la fuga se produce en condiciones de ligera inestabilidad.

5.6. ¿Qué sentido tiene la intensidad umbral que aparece en las ecuaciones [5.8] y [5.9]? ¿Cómo se modificaría el valor de 25,4 kW/m² para ignición sin llama piloto en caso de existir un fuerte viento incidiendo sobre la superficie expuesta?

5.7. Al discutir los efectos beneficiosos de distintas acciones evasivas el CCPS (12) clasifica la evacuación durante una emisión tóxica como de «acción de beneficio incierto». ¿En qué condiciones puede no ser beneficiosa?

5.8. Estimar la masa de la nube producida en un escape de propano sabiendo que al entrar en ignición produjo la rotura de cristales hasta 1,5 km de distancia. ¿A qué distancia es de esperar que se sitúe el umbral de heridas serias a causa de fragmentos de vidrio?

Bibliografía

1. FINNEY, D. J.: *Probit Analysis*. Cambridge University Press. Cambridge (1974).
2. LEES, F. P.: *Loss Prevention in the Process Industries*. Butterworth-Heinemann. Londres (1980).
3. EISENBERG, N. A.; LYNCH, C. J., y BREEDING, R. J.: *Vulnerability Model. A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills*. National Technology Information Service Report AD-A015-245. Springfield (1975).

4. CLAYTON, G. D.; CLAYTON, F. E.; CRALLEY, L. V., y CRALLEY, L. J. (Eds.): *Patty's Industrial Hygiene and Toxicology*. Wiley-Interscience. Nueva York (1985).
5. GUTIÉRREZ MARCO, A. (Fundación MAPFRE): *Curso de Higiene Industrial*. MAPFRE. Madrid (1983).
6. CLAYSON, B. B., y KREWSKI, J. (Eds.): *Toxicological Risk Assessment*. CRC Press. Boca Ratón, Florida (1985).
7. CROWL, D. A., y LOUVAR, J. F.: *Chemical Process Safety, Fundamentals with Applications*. Prentice Hall. Englewood Cliffs (1990).
8. KING, R.: *Safety in the Process Industries*. Butterworth-Heinemann. Londres (1990).
9. HODGE, H. C., y STERNER, J. H.: «Tabulation of Toxicity Classes», *American Industrial Hygiene Association Quart*, 10, 93, diciembre (1949).
10. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY: *Technical Guidance for Hazard Analysis: Emergency Planning for Extremely Hazardous Substances*. EPA Federal Emergency Management Agency. U. S. Department of Transportation Washington D. C. (1987).
11. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE: *Guide for Pressure Relieving and Depressuring Systems*. API Recommended Practice 521. American Petroleum Institute Washington D. C. (1982).
12. CCPS (CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY): *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. AIChE. Nueva York (1989).
13. MUDAN, K. S.: «Thermal Radiation Hazards from Hydrocarbon Pool Fires». *Proc. Energy Combustion Science*, 10, 59 (1984).
14. LAWSON, D. I., y SIMMS, D. L.: «The Ignition of Wood by Radiation». *Br. Journal of Applied Physics*, 3, 288 (1952).
15. Clancey, V.: *Diagnosis Features of Explosive Damage*. Proc. 6th Int. Meeting of Forensic Science. Edimburgo (1972).
16. LANGFORS, V., y KIHLMSTROM, B.: *Rock Blasting*. Almquist and Wiksell. Upsala (1963).
17. BOYKIN, R. F., y KAZARIANS, M.: «Quantitative Risk Assessment for Chemical Operations», en *Proc. Int. Symp. on Preventing Major Chemical Accidents*. WOODWARD, J. L. (Ed.). AIChE. Nueva York (1987).
18. PRUGH, R. W.: «Mitigation of Vapour Cloud Hazards». *Plant Operation/Progress* 4, 95 (1985).
19. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO: *Toxicología Laboral Básica*. INSHT. Madrid (1989).
20. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO: *Higiene Industrial Básica*. INSHT. Madrid (1986).
21. AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS: *Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1991-92*. ACGIH. Cincinnati, Ohio (1991).