



guía técnica

ZONAS DE PLANIFICACIÓN PARA ACCIDENTES GRAVES DE TIPO TÓXICO

(en el ámbito del Real Decreto 1254/99 [Seveso II])



Dirección General
de Protección Civil

UNIVERSIDAD DE MURCIA

Índice general

Presentación	11
Prólogo	13
Capítulo 1. Introducción	15
1.1. Las emisiones de sustancias tóxicas en la industria	15
1.2. Referencias bibliográficas	16
Capítulo 2. Formación y evolución de las nubes tóxicas	17
2.1. Planteamientos generales	17
2.2. Elementos y parámetros implicados en las emisiones	18
2.3. Tipología de las emisiones	21
2.3.1. Fuga de gases por rotura catastrófica del contenedor	22
2.3.2. Fuga de gases a través de orificios	24
2.3.3. Fuga de gases licuados por rotura catastrófica del contenedor	27
2.3.4. Fuga de gases licuados a través de orificios	29
2.3.4.1. Fuga de vapor en equipos que contienen gases licuados	29
2.3.4.2. Fuga de líquidos en equipos que contienen gases licuados	30
2.3.5. Fuga de líquidos en equipos	30
2.4. La evaporación desde charcos	31
2.5. Parámetros meteorológicos que influyen en la mezcla y dispersión de las emisiones	34
2.5.1. La turbulencia del aire	37
2.5.2. Criterios para establecer la dinámica atmosférica	44
2.5.3. Las clases y las matrices de estabilidad	45
2.6. La dispersión pasiva	50
2.7. Las nubes densas: comportamiento y modelos para su estudio	55
2.7.1. Conexión entre la emisión y la dispersión densa	55
2.7.2. Modelos de dispersión de gases densos	56
2.7.2.1. Modelos convencionales modificados	56
2.7.2.2. Modelos dimensionales	57

2.7.2.3. Modelos de semejanza	60
2.7.2.4. Modelos de semejanza avanzados	62
2.7.3. El modelado de la dispersión densa en terrenos complejos y en presencia de obstáculos	66
2.8. Referencias bibliográficas	66
Capítulo 3. La toxicidad de las sustancias químicas en aire	71
3.1. Clasificación de los tóxicos	71
3.1.1. Según la naturaleza química del tóxico	71
3.1.2. Según el mecanismo y el efecto que produce su acción tóxica	71
3.1.3. Según su toxicidad	72
3.2. Toxicidad por vía respiratoria	73
3.2.1. Sustancias irritantes y asfixiantes	73
3.2.2. Parámetros que determinan la toxicidad: concentración y dosis	73
3.3. Referencias bibliográficas	76
Capítulo 4. Valores límite de sustancias tóxicas en aire aplicados a situaciones de emergencia	77
4.1. Descripción de los índices más utilizados	77
4.1.1. AEGLs: Acute Exposure Guideline Levels	77
4.1.2. ERPGs: Emergency Response Planning Guidelines	79
4.1.3. TEELs: Temporary Emergency Exposure Limits	80
4.1.4. IDLH: Immediately Dangerous to Life or Health	81
4.1.5. Índices propuestos por el Ministerio del Interior Holandés	82
4.1.6. EEGLs: Emergency Exposure Guidance Levels	82
4.1.7. SPEGLs: Short-term Public Exposure Guidance Levels	82
4.1.8. LOC: Level of Concern.....	82
4.2. Referencias bibliográficas	82
Capítulo 5. Índices propuestos. Características y limitaciones	85
5.1. Los niveles de daño de los índices AEGLs, ERPGs y TEELs	87
5.2. La relación concentración-tiempo de exposición	86
5.2.1. Interpolación y extrapolación de los índices	89
5.3. Referencias bibliográficas	92
Capítulo 6. Determinación de las zonas de planificación para nubes tóxicas	93
6.1. Niveles de daño en las zonas de planificación para nubes tóxicas	93
6.2. Determinación del alcance de las zonas de planificación para nubes tóxicas	94

Capítulo 7. El programa ALOHA (<i>Areal Locations of Hazardous Atmospheres</i>)	99
7.1. Ejecución del programa y datos de entrada	101
7.2. Expresión de los resultados	109
7.3. Referencias bibliográficas	112
Capítulo 8. Aplicación práctica de la metodología para determinar las zonas de planificación	113
8.1. Sustancia con AEGL	113
8.1.1. Escenario HCl-1. Fuga continua de cloruro de hidrógeno	115
8.1.1.1. <i>Escenario HCl-1.1. Dispersión de la nube semicontinua en las condiciones atmosféricas más desfavorables</i>	116
8.1.1.2. <i>Escenario HCl-1.2. Dispersión de la nube semicontinua en las condiciones atmosféricas más frecuentes</i>	118
8.1.2. Escenario HCl-2. Fuga instantánea de cloruro de hidrógeno	124
8.1.2.1. <i>Escenario HCl-2.1. Dispersión de la nube instantánea en las condiciones atmosféricas más desfavorables</i>	125
8.1.2.2. <i>Escenario HCl-2.2. Dispersión de la nube instantánea en las condiciones atmosféricas más frecuentes</i>	129
8.2. Sustancia con ERPG	133
8.2.1. Escenario NH ₃ . Fuga instantánea de amoníaco	135
8.2.1.1. <i>Escenario NH₃-1. Dispersión de la nube instantánea en las condiciones atmosféricas más desfavorables</i>	136
8.2.1.2. <i>Escenario NH₃-2. Dispersión de la nube instantánea en las condiciones atmosféricas más frecuentes</i>	140
8.3. Sustancia con TEEL	144
8.3.1. Escenario IP. Fuga continua de isopreno	146
8.3.1.1. <i>Escenario IP-1. Evaporación desde un charco y dispersión en las condiciones atmosféricas más desfavorables</i>	146
8.3.1.2. <i>Escenario IP-2. Evaporación desde un charco y dispersión en las condiciones atmosféricas más frecuentes</i>	151
8.4. Referencias bibliográficas	155
Anexo 1. Valores de los índices AEGLs	157
Anexo 2. Valores de los índices ERPGs y TEELs	159
Nomenclatura	161
Terminología	165
Índice de Tablas	167
Índice de Figuras	169

Presentación

La nueva Directriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación ante el Riesgo de Accidentes Graves en los que intervienen Sustancias Peligrosas, constituye la herramienta técnica para la aplicación del Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, cuyo objeto primordial es la prevención de los accidentes graves y la limitación de sus consecuencias para el hombre, el medio ambiente y los bienes.

Ciertos elementos contemplados en el Real Decreto citado necesitan un desarrollo más pormenorizado que el recogido en la propia Directriz Básica. La complejidad, extensión o justificiación de aspectos tales como la tipología de los accidentes y las magnitudes que definen los fenómenos peligrosos, los análisis de efecto dominó, etc., demandan por parte de las administraciones competentes, criterios principalmente técnicos, de carácter homogéneo.

Por ello, la Dirección General de Protección Civil ha considerado necesario elaborar guías recomendatorias de carácter técnico, dirigidas a proponer criterios que permitan interpretar y desarrollar determinados requisitos de la Directriz Básica. Con ese fin se ha establecido un Convenio de colaboración con el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Murcia, cuya experiencia e investigaciones previas en este campo le han llevado a constituirse en un grupo de reconocido prestigio en la planificación de la respuesta ante accidentes graves.

Esta Guía, tras la publicación de la correspondiente a *Zonas de planificación para accidentes graves de tipo térmico*, es el segundo documento técnico fruto del Convenio, tratando específicamente los criterios a seguir en el análisis de la vulnerabilidad de los seres humanos ante accidentes graves en los que se produzcan emisiones de sustancias tóxicas.

Esperamos haber cumplido una vez más nuestro objetivo, que no es otro que facilitar a todos los implicados en el ámbito de seguridad industrial, el desarrollo de su trabajo.

Octubre, 2003

Juan San Nicolás Santamaría
Director General de Protección Civil

José Ballesta Germán
Rector de la Universidad de Murcia

Prólogo

Esta Guía es la segunda de la serie dedicada al desarrollo e interpretación de aspectos técnicos contenidos en la *Directriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación ante el Riesgo de Accidentes Graves en los que Intervienen Sustancias Peligrosas*, proponiendo algunos criterios para el análisis de la vulnerabilidad de los seres humanos afectados por la incidencia de nubes tóxicas.

En la Directriz citada se definen las variables –concentración o dosis– que condicionan el daño de los fenómenos de tipo químico, se proponen los valores límite en aire de las sustancias químicas más utilizados en situaciones de emergencia y se exponen las consideraciones básicas para la utilización de dichos índices para tiempos de paso de las nubes diferentes a los periodos de referencia establecidos en la definición de los mismos. Pero la diversidad de escenarios, las diferencias conceptuales de los valores límite y el diferente comportamiento tóxico de las sustancias, plantean situaciones que necesitan un desarrollo mas amplio que sirva de base para justificar los criterios adoptados y exponga pormenorizadamente la metodología a llevar a cabo para la determinación de las zonas de planificación ante estos accidentes.

Por último, agradecemos las sugerencias y el apoyo prestados por Antonia Garcés de Marcilla en la elaboración de esta Guía.

Los autores

1.1. LAS EMISIONES DE SUSTANCIAS TÓXICAS EN LA INDUSTRIA

Entre los diferentes accidentes graves que pueden producirse en las industrias que almacenan, utilizan o procesan sustancias químicas, las emisiones y la formación de nubes están considerados como los de mayor peligrosidad respecto a sus consecuencias y complejidad en cuanto a su modelización.

La peligrosidad viene determinada por el nivel de toxicidad de las sustancias involucradas y por la persistencia y alcance de las nubes. Una gran parte de las sustancias habituales en la industria presenta elevada toxicidad, provocando efectos agudos, incluso letales, en cortos periodos de tiempo; en muchos casos estos efectos se manifiestan a concentraciones muy pequeñas como consecuencia de su elevada reactividad con componentes biológicos esenciales, que alteran los equilibrios que sustentan la vida. Las características de las emisiones, fundamentalmente las cantidades involucradas, la dinámica atmosférica y las condiciones del entorno, determinan la dirección, persistencia y alcance de las nubes, cuyas consecuencias finales dependen de los elementos vulnerables presentes, pudiendo afectar a zonas muy extensas.

Otra característica que interesa señalar es la rapidez evolutiva de estos accidentes; así, para velocidades bajas de viento –por ejemplo, 2 ó 3 m/s– las nubes pueden alcanzar distancias de varios kilómetros en periodos de tiempo muy cortos. Esta situación es también extensiva en parte, a otros accidentes graves provocados por las sustancias combustibles y explosivas.

La modelización de estos accidentes constituye un aspecto básico de la prevención y protección, dado que el nivel y extensión de las consecuencias permite establecer la proporcionalidad de las medidas necesarias para evitarlas o mitigarlas. Pero, desafortunadamente, la variedad de escenarios posibles y la complejidad de los mecanismos, parámetros y variables implicados dificultan las predicciones, afectando los resultados con elevados niveles de incertidumbre. En este contexto, las características físicas de las sustancias (gases, líquidos volátiles, aerosoles...), las condiciones de las emisiones (con o sin energía inicial –jet o neutra–, vaporización instantánea –flash– o evaporación desde un charco), la formación de nubes ligeras, neutras o pesadas, la variabilidad temporal de los parámetros meteorológicos (dirección y velocidad del viento y clase de estabilidad), la influencia de los elementos del entorno (orografía, hidrología, obstáculos)..., configuran un conjunto de parámetros y circunstancias que justifican la complejidad aludida.

Para evaluar el alcance de consecuencias, se dispone actualmente de numerosos modelos informáticos, *Mazzola y Addis (1995)* y *Less F.P. (2001)*, que partiendo de las características de la sustancia y de las condiciones del equipo accidentado (volumen, cantidad retenida, orificio de fuga...) determinan la cronología de la emisión (instantánea, semicontinua o continua). El resultado se introduce en el módulo de dispersión, que necesita también las variables meteorológicas responsables del transporte y dilución de la nube, proporcionando información sobre los parámetros característicos de la misma, tales como perfiles concentración-tiempo (para determinadas posiciones), concentración-distancia (para determinados instantes), dosis-distancia, etc. Para el desarrollo de los ejemplos propuestos en esta Guía se utiliza el programa ALOHA, desarrollado por la Environmental Protection Agency de EEUU, que está disponible en Internet –*EPA (2002)*–. La utilización de este programa no invalida el empleo de otros, pero la elección debe estar justificada mediante criterios operativos y de calidad.

Esta Guía está configurada en dos partes. En la primera, que incluye los capítulos 2, 3 y 4, se plantean los aspectos generales relacionados con la formación y secuencia evolutiva de las nubes tóxicas, los diferentes mecanismos de toxicidad de las sustancias químicas y los valores límite disponibles para evaluar los efectos que dichas sustancias pueden provocar en los humanos. Todo ello sirve para justificar las metodologías y criterios expuestos en la segunda parte de la Guía, que comienza con la propuesta de los principales valores límite utilizados en situaciones de emergencia –capítulo 5–, aspecto que condiciona la determinación de las zonas de planificación –Intervención y Alerta–, tratada en el capítulo 6. El capítulo 7 describe el programa informático ALOHA que, como se indicó anteriormente, es el utilizado para resolver algunos casos prácticos incluidos en el capítulo 8.

1.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EPA; (2002). *Downloading, Installing and Running ALOHA*. Computer-Aided Management of Emergency Operations. United States Environmental Protection Agency <<http://www.epa.gov/ceppo/comeo/aloha.htm>> [Consulta: 20 de junio de 2002].
- Less, F. P.; (2001). *Loss Prevention in the Process Industries*. Vol 1. Butterworth Hernemann. Oxford.
- Mazzola, C.; Addis, R; (1995). *Atmospheric Dispersion Modeling Resources*. U.S, Department of Energy, Emergency Management Advisory Committee, Subcommittee on Consequence Assessment and Protective Actions and Oak Ridge Associated Universities. <<http://www.bnl.gov/scapa/admr.pdf>> [Consulta: 15 de marzo de 2003].

Formación y evolución de las nubes tóxicas

Como se ha comentado en el capítulo anterior, son muy numerosos los elementos, características y parámetros que pueden intervenir en la emisión, formación y evolución de nubes de productos peligrosos que irrumpen al exterior en algunos accidentes industriales. La descripción detallada de estos aspectos supera los límites y objetivos de esta Guía, pero se ha considerado de interés resumir en este capítulo las etapas más relevantes siguiendo la secuencia evolutiva del fenómeno, con el fin de proporcionar una panorámica general de estos fenómenos. No obstante, deben tenerse presentes las dificultades e incertidumbres asociadas a la predicción o seguimiento de este tipo de accidentes y que se ponen de manifiesto a lo largo de la exposición.

A su vez se incluye la información bibliográfica que permite profundizar en los diferentes aspectos tratados; en este sentido es recomendable citar las publicaciones de *Lees (2001)*, *van den Bosch y Weterings de TNO (1997)* –también conocido como Yellow Book– y la monografía del *Center for Chemical Process Safety de AIChE (1996)*.

2.1. PLANTEAMIENTOS GENERALES

La descripción contenida en este capítulo está referida a las nubes gaseosas formadas a partir de sustancias puras inicialmente en estado líquido o gaseoso, aunque posteriormente puedan formar materia particulada (gotículas, microcristales, etc). No obstante, la mayoría de las características de estas nubes son extrapolables a las formadas a partir de sólidos pulverulentos, exceptuando los elementos iniciales implicados en la dinámica de la emisión de estos últimos (contenedores, mecanismos de formación y mezcla inicial con aire).

La figura 2.1 muestra la secuencia seguida en la formación y evolución de nubes densas, que es la tipología más común producida en los escapes accidentales de sustancias peligrosas, habiéndose dividido en las siguientes etapas:

1. **Emisión**, que está condicionada por el contenedor, las características termodinámicas de la sustancia, las condiciones de almacenamiento (temperatura y presión) la posición y dimensiones de la rotura. En función de estos parámetros el fluido irrumpe en el exterior de forma monofásica (totalmente gasificado o prácticamente líquido) o bifásica. La fase líquida se extiende sobre el terreno y se evapora en función de mecanismos térmicos (transmisión de calor desde el suelo y el aire) y másicos (por transferencia desde el charco al aire).

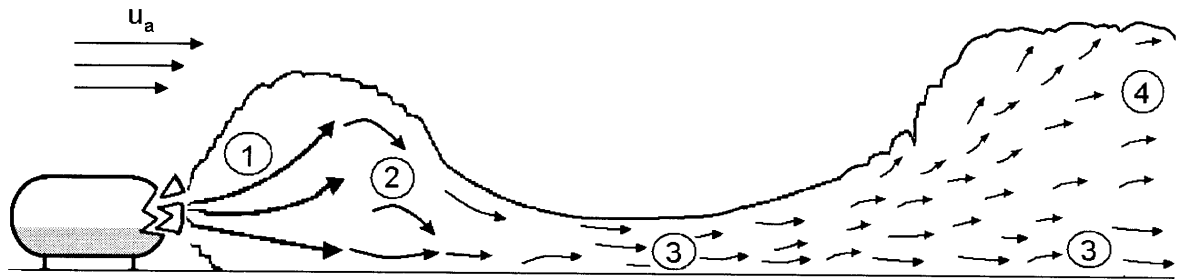


Figura 2.1. Esquema básico de la evolución de una nube de gas denso.

2. **Abatimiento sobre el suelo.** Las fluidodinámicas de la emisión gaseosa y de la atmósfera circundante condicionan la mezcla inicial de la sustancia y el aire; si la densidad de la nube es mayor que la del aire se produce el abatimiento de dicha mezcla.
3. **Extensión y avance por gravedad.** La nube pesada se comporta de forma parecida a como lo haría un líquido, esto es, se extiende y discurre sobre el terreno, adaptándose a la geometría del mismo y ocupando las zonas más bajas. La fuerza gravitatoria domina a las de flotación y dispersión durante esta etapa.
4. **Dispersión pasiva.** La progresiva entrada de aire en el frente de avance y, en menor medida, a través de la zona superior de la nube reptante, hace disminuir la densidad de la “interfase”, hasta que sus características fluidodinámicas se aproximan a las del aire próximo, iniciándose entonces la denominada dispersión pasiva.

Si la sustancia emitida tiene una densidad similar o menor a la del aire (gas neutro o ligero), o si la mezcla en el momento de la emisión es muy intensa, de manera que se produce una rápida disminución de la densidad, sólo se verifican las etapas citadas en primer y último lugar, esto es, la emisión y la dispersión pasiva.

2.2. ELEMENTOS Y PARÁMETROS IMPLICADOS EN LAS EMISIONES

En primer lugar interesa conocer el estado físico de la sustancia o producto que irrumpe al exterior y la masa o caudal emitido. Estos aspectos dependen de la combinación de los elementos que se describen a continuación:

1. **Los contenedores**, en los que cabe distinguir tres tipologías: **depósitos, tuberías conectadas a depósitos y tuberías aisladas.**

La geometría de los depósitos tiene escasa relevancia en la dinámica de la emisión, siendo la altura del recipiente la característica más destacable por su influencia en la dilución inicial, si la fuga se produce por la parte superior del equipo. En todo caso, la geometría de los contenedores, ya sean de almacenamiento o equipos de proceso, puede asimilarse a esferas o cilindros (horizontales o verticales).

La disponibilidad o no de aislamiento térmico en los depósitos puede tener una influencia notable en ciertos casos. Así, las fugas de gases a través de orificios de equipos que contienen gases licuados, pueden tener comportamientos diferentes en

función de que reciban o no calor exterior. Si no hay aislamiento, la fracción líquida recibe calor exterior y el proceso de fuga puede transcurrir en régimen cuasi isotérmico; si dispone de aislamiento el régimen se considera adiabático.

En las tuberías conviene conocer si están o no conectadas a depósitos. En el primer caso, si sufre una rotura, se producirá la emisión o vertido condicionados por el volumen almacenado en el depósito, produciéndose, si no se bloquea, una fuga cuasi estacionaria de larga duración. En el segundo caso, el caudal de emisión es decreciente y a veces cíclico, como es el producido en la fuga de líquidos, que necesitan reemplazar los vertidos por iguales volúmenes de aire que circulan en sentido contrario al líquido. En ambos casos el caudal de fuga depende de las condiciones de almacenamiento de la sustancia, de la geometría de la tubería (longitud y diámetro), de la fricción del fluido con las paredes de la misma y del coeficiente de descarga.

En la figura 2.2 se señalan las zonas o elementos que se ven más frecuentemente afectados por roturas.

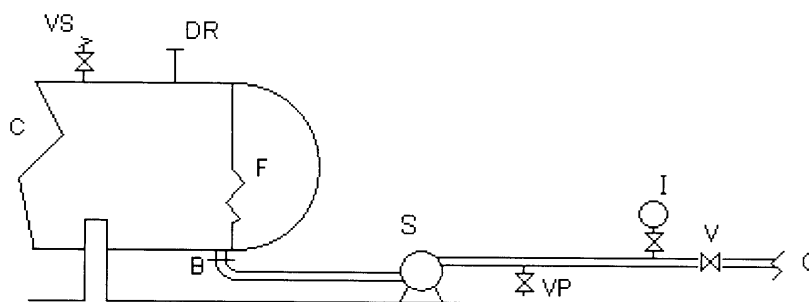


Figura 2.2. Zonas o elementos típicos a través de los que se producen con más frecuencia fugas accidentales. C: colapso de equipo o tubería. F: fisura por fallo de material o soldadura. Roturas de bridas (B), instrumentos (I), válvulas (V), prensas de bomba (S). Apertura o rotura de válvula de seguridad (VS), de purga (VP) o de disco de ruptura (DR).

- 2. El estado físico de los fluidos** en el momento de la fuga juega un papel muy importante. Cabe distinguir entre gases, gases licuados y líquidos, que dependen de la presión y temperatura de almacenamiento.

Con referencia a las sustancias puras, el estado físico y caudal de fuga depende de sus propiedades termodinámicas, siendo muy útiles los diagramas presión-entalpía (figura 2.3) o temperatura-entalpía, cuyo significado y alcance se describen en los textos de termodinámica.

En el diagrama de la figura 2.3 se han representado tres puntos situados en regiones de interés: A, en la fase líquida; B en la región de equilibrio líquido-vapor y C en la fase vapor, que pueden pertenecer a la misma sustancia a presión constante, P_x , pero a diferentes temperaturas, lo que modifica las demás propiedades (entalpía, entropía y densidad).

Las sustancias líquidas almacenadas a temperatura inferior a la de ebullición a presión atmosférica (como el caso A) tienen sobre ellas un espacio ocupado por un gas (aire u otro componente inerte, como nitrógeno, dióxido de carbono, etc), que

contiene la sustancia en fase gaseosa, cuya presión parcial en el equilibrio coincide con la presión de vapor a la temperatura de almacenamiento (P_A en el diagrama). Una excepción a este caso lo constituyen los almacenamientos en tanques de techo flotante, donde no hay prácticamente cámara de gas, al estar el líquido en contacto directo con la cubierta superior móvil.

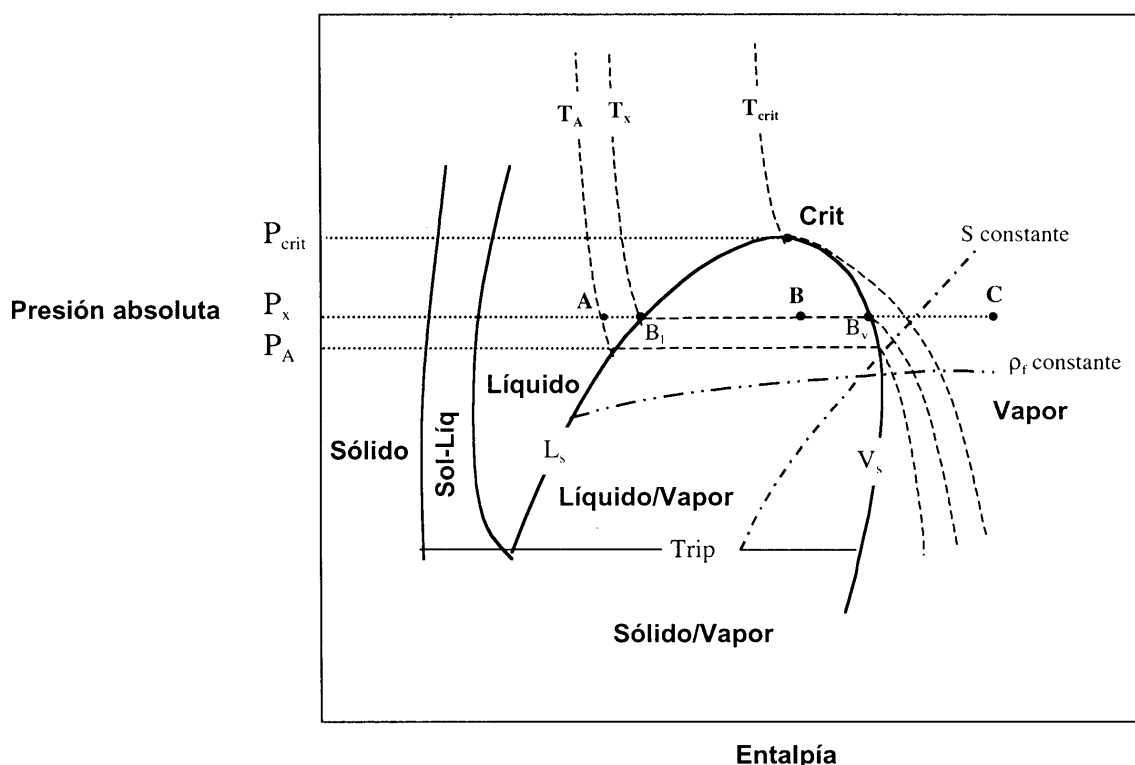


Figura 2.3. Diagrama presión-entalpía. Líneas de isopropiedades y puntos característicos: T , temperatura; S , entropía (sólo se representa una línea); ρ_f densidad del gas o vapor (sólo se representa una línea); L_s línea de líquido saturado; V_s línea de vapor saturado; Crit, punto crítico; Trip, línea del punto triple.

La situación del punto B en el diagrama informa sobre las fracciones másicas relativas de las fases líquida (m_l) y vapor (m_v), verificándose:

$$\frac{m_l}{m_v} = \frac{\overline{BB_v}}{\overline{BB_l}} \quad (2.1)$$

donde $\overline{BB_v}$ y $\overline{BB_l}$ son las distancias desde B a las líneas de equilibrio V_s y L_s , medidas sobre la isoterma T_x . Así, conforme B se aproxima a B_l aumenta la fracción de la fase líquida, ocurriendo lo contrario cuando se aproxima a B_v .

El diagrama de la figura 2.3 permite seguir evoluciones isoentrópicas que se aproximan al comportamiento real de los fluidos durante la fuga. Asimismo, mediante balances entálpicos puede quedar definida la situación final del fluido antes de su mezcla con el aire circundante.

3. El tamaño del orificio de fuga establece la duración de la emisión (gas) o vertido (líquido), verificándose:

Si el orificio es grande con relación al volumen del recipiente (siendo la rotura catastrófica el caso extremo) la irrupción suele ser muy rápida, considerándose en los modelos de fuga comúnmente utilizados como “instantánea”.

Si el orificio es pequeño con relación al volumen del recipiente se produce una fuga continua, aunque generalmente de caudal decreciente. El tipo de fuga depende del estado físico del fluido y de la situación (altura del orificio en el contenedor), salvo que se trate de un gas almacenado a presión, en el que la posición del orificio es irrelevante.

- 4. Cuando se trata de vertidos, el grado de contención alrededor de los equipos condiciona la formación de los charcos.** Un cubeto, un depósito semienterrado o una tubería canalizada en zanja facilita la recogida y disminuyen el área de evaporación. Por el contrario, en terreno llano y sin obstáculos el líquido se extiende, aumentando el área de evaporación y, por consiguiente, se incrementa el caudal másico evaporado, aspectos que se desarrollan más adelante.

2.3. TIPOLOGÍA DE LAS EMISIONES

La descripción efectuada en el apartado anterior facilita el estudio de las fugas más relevantes. Para ello, se combinan los diferentes estados físicos de las sustancias –gases, gases licuados y líquidos– con las formas genéricas de rotura (catastrófica y a través de orificios), lo que permite determinar, en cada caso, la energía inicial de la emisión y la cantidad o caudal que se incorpora al aire, parámetros de partida para conocer la evolución posterior de las nubes.

Cualquier situación de fuga puede abordarse desde el punto de vista cuantitativo aplicando las ecuaciones de balance de masa y energía. Ambas ecuaciones pueden tener formas muy diversas, aunque las más utilizadas son las indicadas a continuación –Lees (2001)–:

$$\dot{m} = Q\rho_f = u_f A\rho_f \quad (2.2)$$

$$-dq + dw + dH + gdz + d\left(\frac{u_f^2}{2}\right) = 0 \quad (2.3)$$

donde \dot{m} : caudal másico, kg/s
 Q : caudal volumétrico, m³/s
 ρ_f : densidad del fluido, kg/m³
 u_f : velocidad del fluido, m/s
 A : área, m²

Los términos descritos a continuación se expresan en J/kg:

$-dq$: calor intercambiado por el fluido con el exterior; en los procesos adiabáticos es nulo.

dw : trabajo mecánico intercambiado por el fluido con el exterior como consecuencia de la presencia de una máquina; en los casos aquí estudiados es nulo.

dH : variación de la entalpía.

gdz : variación de la energía potencial, donde g es la aceleración de la gravedad y dz la variación de la altura geométrica; este término sólo es relevante en las fugas de líquidos.

$d\left(\frac{u_f^2}{2}\right)$: variación de la energía cinética.

Con las hipótesis simplificadoras que pueden adoptarse en los casos aquí estudiados, la ecuación de conservación de la energía queda muy simplificada y puede adquirir otras formas, tal y como se comenta más adelante. A continuación se tratan brevemente los tipos de fugas más frecuentes en los accidentes relacionados con sustancias peligrosas.

2.3.1. Fuga de gases por rotura catastrófica del contenedor

Se considera en este caso cualquier sustancia en estado gaseoso, contenida en un recipiente sin presencia de líquido, lo que incluye, por ejemplo, a los gases permanentes (monóxido de carbono, fosgeno, hidrógeno...) o a los líquidos almacenados por encima de la temperatura de ebullición a la presión de almacenamiento, siendo ésta superior a la atmosférica.

Al producirse la rotura del recipiente (de volumen V_1), el gas pasa bruscamente desde la presión de almacenamiento (P_1) a la atmosférica ($P_2 = P_{atm}$) por lo que sufre una expansión que, dada su rapidez, se considera adiabática, disminuyendo su temperatura hasta T_2 . Suponiendo que el gas se comporta como ideal, se verifica:

$$P_1 V_1^k = P_{atm} V_2^k \quad (2.4)$$

$$\frac{P_1^{\frac{k-1}{k}}}{T_1} = \frac{P_2^{\frac{k-1}{k}}}{T_2} \quad (2.5)$$

donde k es el índice de expansión adiabática, adimensional, cuyo valor no es conocido, salvo que se considere que la transformación es isoentrópica, esto es, que la expansión adiabática se verifica en sucesivas etapas de equilibrio. En estas condiciones el índice k coincide con γ , denominado coeficiente de expansión isoentrópica, que se determina mediante:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (2.6)$$

donde C_p y C_v son los calores específicos (J/kgK) a presión y volumen constante, respectivamente. En la tabla 2.1 se indican valores de γ para algunos gases tóxicos de interés, observándose que están comprendidos aproximadamente entre 1.3 y 1.4 –Perry (1973)–.

TABLA 2.1. Valores de γ a 15° C y 1 atm para algunos gases tóxicos

Sustancia	γ
Amoniaco	1.310
Bromuro de hidrógeno	1.420
Cloro	1.355
Cloruro de hidrógeno	1.410
Monóxido de carbono	1.404
Sulfuro de hidrógeno	1.320

Si el gas se comporta como perfecto, puede determinarse γ en función de C_v o C_p :

$$\gamma = \frac{C_v + R}{C_v} = \frac{C_p}{C_p - R} \quad (2.7)$$

donde R es la constante universal de los gases.

El parámetro k es menor que γ por lo que si se le asigna un valor de 1.2 y se hace uso de la ecuación 2.5 se verifica:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.17} \quad (2.8)$$

Así, si en la ecuación 2.8 la presión de almacenamiento supera 10 veces la atmosférica, la relación T_2/T_1 adquiere el valor 0.68. Así, para una temperatura inicial de 293 K (20 °C), la expansión provocaría el enfriamiento del gas hasta 199 K (-74 °C).

Debe tenerse en cuenta que las ecuaciones 2.4 y 2.5 son aplicables sólo a los gases, de manera que si el enfriamiento provocado por la expansión conduce a la formación parcial de fase líquida, las ecuaciones citadas no pueden utilizarse, debiéndose realizar el balance de entropía, suponiendo que no varía durante la expansión ($S_l = S_2$), en la forma:

$$S_{lv} = (1 - m_v)S_{2l} + m_v S_{2v} \quad (2.9)$$

donde m_v es la fracción másica del vapor y los subíndices l y v de S designan las fases líquida y vapor, respectivamente.

En la figura 2.4 se representan dos situaciones accidentales genéricas: sin cambio de fase (A) y con cambio de fase (B), que ayudan a la comprensión de los fenómenos citados.

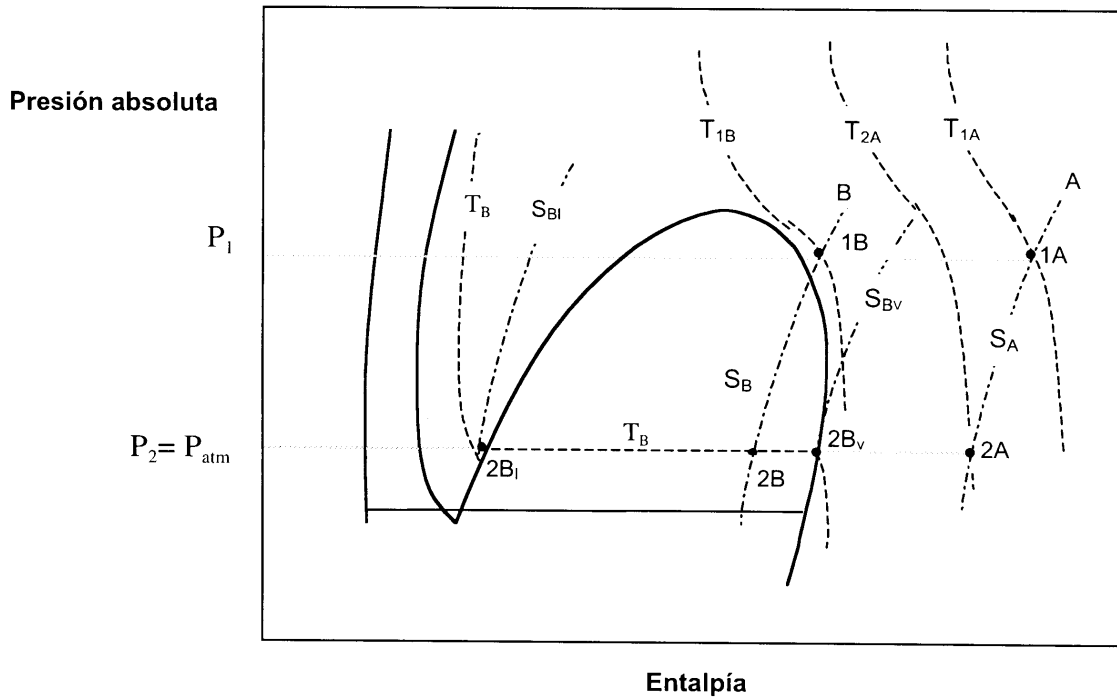


Figura 2.4. **A:** transformación isoentrópica sin cambio de fase; el gas está inicialmente en 1A, a P_1 y a elevada temperatura (T_{1A}) y se expande adiabáticamente (siguiendo la isocálida S_A) hasta alcanzar la presión atmosférica, en 2A, que sigue estando en la fase gaseosa aunque a menor temperatura (T_{2A}). **B:** transformación isoentrópica con cambio de fase; el gas está inicialmente en 1B, a P_1 y a T_{1B} (inferior a T_{1A}) y se expande adiabáticamente (siguiendo la isocálida S_B) hasta alcanzar la presión atmosférica, en 2B, que está en la región bifásica a T_B . El punto 2B se separa en las fases vapor (2B_v) y líquida (2B_l), por donde pasan las isocálidas isoentrópicas S_{Bv} y S_{Bl} que son las utilizadas en la ecuación 2.9.

2.3.2. Fuga de gases a través de orificios

En este caso los orificios deben ser pequeños con relación al volumen del contenedor; si no es así, el depósito se despresurizaría rápidamente y la tipología de la fuga sería de muy corta duración y, por consiguiente, similar al caso anterior. En la práctica, estas fugas se producen por rotura de elementos y accesorios de tuberías o en pequeñas fisuras de los contenedores (ver figura 2.2).

Para determinar el caudal de fuga deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

1. La posición del orificio en el contenedor no influye en el caudal de fuga.
2. Se acepta que la expansión sufrida por el gas en la salida es adiabática.
3. Los gases pueden tener dos regímenes de fuga que dependen de la relación de presiones interior/exterior (P_1/P_2), donde en este caso la presión exterior es siempre la atmosférica ($P_2 = P_{atm}$). Si se verifica:

$$\frac{P_1}{P_2} < \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.10)$$

donde k es el índice de expansión adiabática antes definido, el régimen se denomina subsónico; en estas condiciones, la velocidad del gas a través del orificio es inferior a la velocidad del sonido en dicho gas. Con referencia a la ecuación 2.10 y asignando a k un valor medio de 1.3 se obtiene $(P/P_2) < 1.8$, de manera que el régimen subsónico se produce a presiones inferiores a 1.8 veces la atmosférica, aproximadamente. En este régimen, el caudal másico del gas a través del orificio (\dot{m}_g) depende de las presiones P_1 y P_{atm} , verificándose para un gas perfecto –Santamaría y Braña (1994)–:

$$\dot{m}_g = C_D A_o P_1 \sqrt{\frac{2M_s}{RT_1} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_{atm}}{P_1} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_{atm}}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (2.11)$$

donde C_D : coeficiente de descarga a través del orificio, adimensional. Es un parámetro inferior a la unidad que tiene en cuenta la contracción de la vena líquida en el orificio y la pérdida de carga a través del mismo.

A_o : área del orificio, m².

M_s : masa molecular de la sustancia, kg/kmol.

En la mayoría de las situaciones reales, la presión de almacenamiento de los gases supera el valor correspondiente al régimen subsónico (1.8 veces la presión atmosférica en el ejemplo anterior), por lo que resulta habitual que la fuga a través del orificio comience en régimen sónico; también denominado crítico, que ocurre siempre que se verifique la situación contraria a la anterior, esto es cuando:

$$\frac{P_1}{P_2} \geq \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2.12)$$

En este caso, la velocidad del sonido, c_{son} , en un gas ideal, viene dada por la expresión siguiente:

$$c_{son} = \sqrt{\left(\frac{kP_{atm}}{\rho_2} \right)} \quad (2.13)$$

donde ρ_2 es la densidad del gas a la salida. En este régimen la velocidad del gas a través del orificio coincide con c_{son} , y permanece así hasta que se alcanza el régimen subsónico.

Ahora el flujo másico depende de la presión interior pero no de la exterior, en la forma:

$$\dot{m}_g = C_D A_o \sqrt{P_1 \rho_1 k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (2.14)$$

donde ρ_1 es la densidad del gas en el contenedor.

Las ecuaciones 2.11 y 2.14, (utilizadas también para determinar los flujos a través de válvulas de seguridad y discos de ruptura), se han deducido considerando que el gas se comporta como perfecto; en esas condiciones, teniendo en cuenta el comportamiento adiabático de la expansión, puede utilizarse la ecuación 2.5 que permite determinar la temperatura a la salida. Si en la expansión se forma fase líquida (gotículas) conviene partir de la ecuación general (ecuación 2.3), siendo dq , dw y dz nulos o despreciables, verificándose:

$$dH + d\left(\frac{u_f^2}{2}\right) = 0 \quad (2.15)$$

de aquí puede deducirse fácilmente el flujo másico:

$$\dot{m}_g = A_o \rho_2 \sqrt{2(H_1 - H_2)} \quad (2.16)$$

La fracción másica de líquido formada puede obtenerse mediante un balance de entropía ($S_1=S_2$), ecuación 2.9.

4. Según se indica en el párrafo anterior, la cronología más habitual del flujo es que comience siendo sónico, disminuyendo progresivamente la presión interior del recipiente hasta que el régimen pase a subsónico. Por consiguiente, se trata de un proceso no estacionario que puede abordarse mediante dos modelos relacionados entre sí: el primero, (submodelo de fuga), determina la masa emitida a través del orificio, mediante las ecuaciones 2.14 y 2.11; y el segundo, (submodelo del depósito), sigue el comportamiento del gas en el interior. El procedimiento se lleva a cabo de la forma siguiente:
 - Se hace una estimación previa del tiempo de vaciado del depósito. Para ello, se toma como valor de la presión interior la mitad de la inicial ($P_1/2$); si esta presión resulta superior a la que provocaría el régimen sónico, se utiliza la ecuación 2.14, si no es así se elige la ecuación 2.11. Una vez estimado el tiempo de vaciado, se divide éste por un número no inferior a 50 –*van den Bosch y Weterings (1997)*–, obteniéndose así el intervalo Δt_i , utilizado en el cálculo indicado seguidamente. En cada intervalo Δt_i se supone que el caudal de fuga (\dot{m}_{g_i}) no varía.
 - En el primer intervalo –cuando se inicia la fuga– se calcula el caudal (\dot{m}_{g_i}) y la masa fugada ($\dot{m}_{g_i} \cdot \Delta t_i$). Con esta última se determinan las condiciones del depósito al final del primer intervalo, que es el principio del segundo (P_2, T_2, V_1). Para ello, TNO propone considerar que conforme disminuye el contenido del gas, el comportamiento del sistema es adiabático, obteniendo:

$$\rho_2 - \rho_1 = \frac{\dot{m}_{g_i} \Delta t_i}{V_1} \quad (2.17)$$

$$T_1 - T_2 = \frac{P_1}{\rho_1^2 C_v} \frac{\dot{m}_{g1} \Delta t_1}{V_1} \quad (2.18)$$

$$P_2 = \frac{\rho_2}{M_s} RT_2 \quad (2.19)$$

- En el segundo intervalo se opera de la misma forma, partiendo de \dot{m}_{g2} (obtenido con P_2), y así sucesivamente hasta que el depósito adquiera una presión interna próxima a la atmosférica.
- Probablemente el tiempo de vaciado obtenido ahora no coincida con el estimado al principio, pero lo importante es haber utilizado un número elevado de intervalos de cálculo, por ejemplo, más de 30, para que, de esta manera, se pueda considerar el procedimiento como pseudoestacionario.

En cuanto a la fuga de gases desde tuberías largas, cabe distinguir dos casos:

1. Que la tubería esté conectada a un depósito, en cuyo caso, son válidas las consideraciones expuestas anteriormente, con la salvedad de que habrá que incluir la pérdida de carga debida al tramo de tubería dentro del parámetro C_D . Como antes, la salida del gas podría considerarse pseudoestacionaria en intervalos pequeños de tiempo.
2. Que la tubería no esté conectada a depósito. El flujo a través de ella es intrínsecamente no estacionario. *Weiss (1988)* propone un modelo que predice el tiempo que tarda en descargarse una tubería de gas a través de pequeños orificios. El modelo empírico de *Wilson -Hanna (1987)-* puede ser utilizado para predecir el caudal másico de salida en función del tiempo cuando la rotura de la tubería es total.

En cualquier caso, el flujo de gas sale en chorro a más o menos velocidad mezclándose con el aire. Como es sabido, el chorro mantiene longitudinalmente su momento cinético ($\rho \cdot Q \cdot u$), pero dado que el caudal (Q) crece como consecuencia de la progresiva entrada de aire, la velocidad (u) disminuye, y cuando se aproxima a la del aire circundante puede evolucionar de alguna de las formas siguientes: si la densidad de la mezcla se aproxima a la del aire y la dinámica de éste es suficiente para evitar el abatimiento de la nube, se inicia la dispersión pasiva; en caso contrario, se abate, formándose una nube densa y continua.

2.3.3. Fuga de gases licuados por rotura catastrófica del contenedor

De forma análoga a los gases, se supone que el recipiente de volumen V_l , conteniendo un componente bifásico, almacenado a P_l y T_l , sufre una brusca rotura, produciéndose una gran expansión de manera que el fluido alcanza casi inmediatamente la presión atmosférica. Como antes, la rapidez del proceso permite suponerlo adiabático, pero en este caso una parte del líquido se vaporiza, de manera que el calor latente necesario para dicho cambio de fase lo toma del propio líquido, lo que produce su enfriamiento.

El proceso de evaporación ocasiona la formación de burbujas en el seno del líquido, que al romperse generan gran cantidad de gotículas líquidas (spray). Reid (1974), Maurer y cols (1977) y Fletcher (1982), experimentando con amoníaco, propileno y freón 11 licuados, respectivamente, observaron el fenómeno anterior de manera que la mayor parte del líquido remanente es arrastrado y permanece en la fase vaporizada. No obstante, cabe indicar que este comportamiento depende del fluido y de las condiciones de almacenamiento en el momento de la rotura, pero, en general, y aun aceptando que una parte significativa del líquido caiga y se extienda en el suelo, la evaporación suele ser suficientemente rápida formándose una nube cuasi instantánea, donde la progresiva entrada de aire terminará vaporizando las gotículas. No obstante, si la sustancia es muy higroscópica puede formar nieblas que permanecen durante amplios periodos (horas).

Hardee y Lee (1975), Hess y cols. (1974) y Maurer y cols. (1977), propusieron modelos que tratan de describir el fenómeno en sus diferentes fases: la emisión, la entrada de aire en la nube inicial (lo que provoca la progresiva evaporación de las gotículas lo que, a su vez, enfría la mezcla) y el crecimiento de la nube.

Hardee y Lee suponen que la primera etapa de expansión es isoentrópica, cuyo balance numérico o representación gráfica en un diagrama presión-entalpía permite determinar las masas de vapor y líquido y la temperatura después de la expansión, figura 2.5.

La evolución posterior de la nube es similar a la comentada para los gases, aunque en este caso la masa de líquido remanente suele ser elevada, extendiéndose en el suelo y evaporándose con mayor o menor rapidez, aspectos que se tratan en el Apartado 2.4.

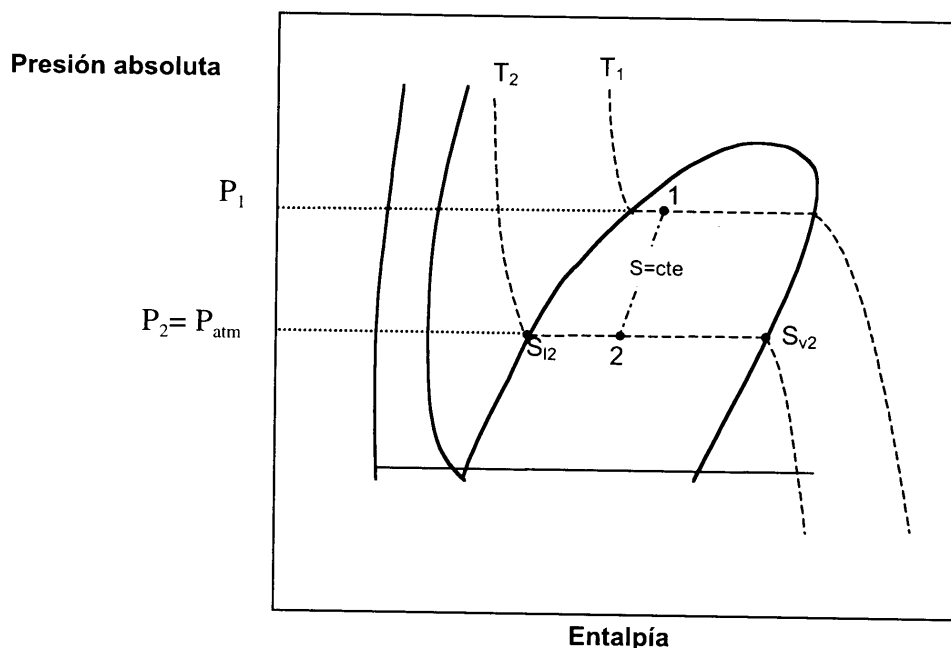


Figura 2.5. Expansión adiabática de una hipotética mezcla líquido-vapor desde la situación inicial (1) a la final (2), observándose el aumento de la fase vapor y la disminución de la temperatura.

2.3.4. Fuga de gases licuados a través de orificios

En este caso cabe distinguir varias posibilidades de fuga en función de la posición del orificio en el contenedor. Como primera aproximación, puede aceptarse que si el orificio está situado en la zona del vapor, el flujo será predominantemente gaseoso; y si está en contacto con el líquido se produce la salida de éste formándose un *flash* en el exterior.

Un parámetro fundamental cuando hay flujo de dos fases es la fracción másica de vapor que caracteriza el estado termodinámico inicial del material que se derrama. Un método analítico para predecir el tipo de flujo en líquidos no espumosos, desde un depósito vertical durante una despresurización, es el desarrollado por la AIChE –*Melhelm (1993)*–.

De las diferentes tipologías de fuga, éstas son las que presentan el mayor nivel de complejidad, de tal manera que algunos mecanismos y comportamientos no son aún bien conocidos. Así, a pesar del esfuerzo investigador llevado a cabo hasta ahora, las características concernientes a los modelos de flujo, el equilibrio (o desequilibrio) entre fases, el flujo crítico, las velocidades relativas de las fases y los factores de fricción tanto en tuberías como en los orificios de fuga no están suficientemente resueltos.

La bibliografía sobre este tema es muy amplia, habiendo sido recopilada y clasificada por *Less (2001)* hasta finales de la década de 1990; entre ella destacan especialmente los trabajos de *Wallis (1969)*, *Butterwoth y Hewitt (1977)* y *Chisholm (1983)*.

2.3.4.1. Fuga de vapor en equipos que contienen gases licuados

Esta tipología es análoga a la fuga de gases, antes citada. También aquí se plantean dos comportamientos relacionados: la fuga propiamente dicha, y la repercusión de ésta en el fluido almacenado (dinámica del recipiente).

La fuga puede considerarse adiabática, y, como antes, debe establecerse su régimen de salida (sónico o subsónico). El principal problema que puede presentarse es la salida simultánea de líquido arrastrado por la espuma formada en el interior; a este fenómeno se le denomina “flujo champán”, por su análogo comportamiento, producido de la forma siguiente: la salida de vapor hace disminuir la presión interior, provocando la evaporación progresiva de la fase líquida, lo que genera la formación de burbujas en el interior del líquido (nucleación), que dependiendo de la tensión superficial, puede formar espuma permanente que llena la cámara del vapor y sale por el orificio, arrastrando importantes cantidades de líquido. Dada la gran diferencia de densidades entre el líquido y el vapor, este frecuente comportamiento afecta muy significativamente al caudal de emisión, habiéndose propuesto numerosos modelos empíricos que tratan de describir el fenómeno –*Less (2001)*–, pero en todos los casos los resultados están afectados por un elevado nivel de incertidumbre.

La evolución del líquido en el interior del recipiente puede considerarse adiabática o isotérmica, dependiendo de si el equipo está o no aislado térmicamente. En el primer caso, la evaporación hace que el líquido se enfríe, disminuyendo la presión de vapor y, por consiguiente, también lo hará el caudal del vapor (ver ecuaciones 2.11 y 2.14). Si la evolución es isotérmica, se mantiene invariable la presión de vapor y también el caudal de fuga. En la mayoría de las situaciones reales, el comportamiento es intermedio entre los citados.

La mayor complejidad de cálculo se presenta en las tuberías. La mezcla de fases en el interior y la influencia en los parámetros de los que depende la fricción, la velocidad relativa de circulación de los dos fluidos, las limitadas velocidades de transferencia de calor y materia entre las fases, que ralentiza la consecución del equilibrio entre ellas..., justifican la complejidad aludida. No obstante, tratando de simplificar puede aceptarse que la fuga está formada por la mezcla que circula por la tubería, esto es, se supone que la composición de la emisión no depende de la posición del orificio. *Morrow y cols. (1982)* proponen un método de estimación del flujo de salida para este caso.

2.3.4.2. Fuga de líquidos en equipos que contienen gases licuados

El mecanismo de esta fuga es más sencillo que el anterior. El líquido sale como consecuencia de la presión del vapor en el interior y de la carga producida por la altura de líquido –ver apartado siguiente–. Conforme disminuye el nivel del líquido, parte de éste se evapora para mantener las condiciones de equilibrio líquido-vapor en el recipiente. El caudal másico evaporado en el interior es muy pequeño, lo que hace que el enfriamiento del líquido sea irrelevante y, por consiguiente, la presión en la cámara de vapor apenas experimentará variación durante todo el periodo de fuga.

Debe tenerse en cuenta el posible flash sufrido a la salida, donde una parte del líquido se evapora y se enfría hasta su temperatura de ebullición a la presión atmosférica. Por consiguiente, la nube formada estará constituida por el vapor del flash y el evaporado al extenderse el líquido por el suelo. El cálculo de las fracciones másicas de vapor y líquido en el flash se hace de la misma forma que el descrito en el apartado anterior.

2.3.5. Fuga de líquidos en equipos

Aquí, la denominación de líquido está referida a cualquier sustancia cuya temperatura de ebullición es superior a la de almacenamiento y a la ambiental.

Esta tipología es la más sencilla dado que la práctica incompresibilidad de estos fluidos simplifica las expresiones que permiten determinar el caudal de fuga y el tiempo de descarga.

Generalmente, la presión del gas (aire o gas inerte) sobre el líquido suele ser pequeña. Si no es así, debe tenerse en cuenta en el balance energético –ecuación de Bernoulli (2.20)– que, simplificada, permite determinar el caudal volumétrico, Q :

$$Q = C_D A_o \sqrt{2 \left[g(z_l - z_o^*) + \frac{\Delta P}{\rho_l} \right]} \quad (2.20)$$

donde z_l : altura del nivel del líquido respecto al fondo del recipiente, m.

z_o^* : altura del orificio respecto al fondo del recipiente, m.

ΔP : diferencia de presiones de la fase gas y la atmosférica, N/m².

ρ_l : densidad del líquido, kg/m³.

El caudal, (ecuación 2.20), disminuye conforme lo hace z y ΔP . Teniendo en cuenta la relación entre Q y z se verifica:

$$Q = -A \frac{dz}{dt} \quad (2.21)$$

donde A es la superficie libre del líquido en el contenedor que, a su vez, puede ser constante (en los cilindros verticales) o función de z , como es el caso de los cilindros horizontales o esferas.

Combinando las ecuaciones 2.20 y 2.21 se determina el tiempo de descarga, t_d :

$$t_d = \frac{l}{\sqrt{2}C_D A_0} \int_{z_0}^z \frac{A(z)}{\sqrt{g(z - z_0) + \Delta P / \rho_l}} dz \quad (2.22)$$

La expresión de la integral depende del tipo de recipiente, así para un cilindro vertical, que es el caso más sencillo, suponiendo $z_0 = 0$, se obtiene:

$$t_d = \frac{A}{C_D A_0} \sqrt{2gz} \quad (2.23)$$

Para otras geometrías de depósitos, se pueden utilizar las expresiones dadas por *Sommerfeld y Stallybrass (1993)*, *Hart y Sommerfeld (1993)* y *Lee y Sommerfeld (1994)*.

Si la fuga se produce a través de una tubería conectada a un depósito, debe considerarse la fricción ocasionada por la misma, lo que haría disminuir el parámetro C_D .

El líquido que se extiende sobre el suelo se evapora, siguiendo los mecanismos comentados en el siguiente apartado.

2.4. LA EVAPORACIÓN DESDE CHARCOS.

La evaporación del líquido que se extiende por el suelo se produce como consecuencia de dos mecanismos de transporte simultáneos:

- 1. De energía.** El cambio de fase de líquido a vapor precisa un aporte de energía. En la mayoría de los casos la temperatura del líquido permanece aproximadamente constante, dado que se alcanzan rápidamente las condiciones de equilibrio, siendo el calor latente el requerimiento energético necesario, verificándose:

$$\dot{q}^* = \dot{m}^* \Delta H_{vap} \quad (2.24)$$

donde \dot{q}^* (J/m^2s) es el flujo específico de calor transferido desde el entorno al líquido; \dot{m}^* (kg/m^2s) es el caudal másico específico de líquido evaporado y ΔH_{vap} (J/kg) es la entalpía de cambio de estado que, como se indicó antes, coincide prácticamente con el calor latente de la sustancia.

2. **De materia.** La fuerza impulsora necesaria para esta transferencia es la diferencia entre la presión de vapor a la temperatura de la superficie del líquido $P_{v(T)}$ (N/m²) y la presión parcial de la sustancia en el aire, P_p (N/m²), esto es:

$$\dot{m}^* = \frac{K_m M_s}{RT_l} (P_{v(T)} - P_p) \quad (2.25)$$

donde: \dot{m}^* : caudal másico específico de líquido evaporado, kg/(m²s).

K_m : coeficiente de transferencia de materia, m/s.

T_l : temperatura del líquido, K

Por otro lado, son numerosos los elementos que intervienen en la cinética de la evaporación, entre los que cabe destacar;

- **El tipo de líquido.** Si el vertido es un gas licuado, adquiere al salir su temperatura de ebullición y al contactar con el suelo hierve, evaporándose rápidamente; por esta razón estos “líquidos” se denominan “hirvientes”. En este caso, el mecanismo limitante inicial es la transferencia de calor, en mayor medida por conducción (a través del suelo), y menos por convección (desde el aire) y radiación (solar, ¿incendios?). Dado el elevado caudal de evaporación inicial, el suelo se enfría rápidamente, lo que, a su vez, hace disminuir el caudal de evaporación subsiguiente. La transferencia de calor desde el suelo es un proceso no estacionario que viene dado por la expresión siguiente –Santamaría, (1994)–:

$$q = \frac{k_{sl}(T_{sl} - T_l)}{\sqrt{\pi\alpha_{sl}t}} \quad (2.26)$$

donde T_{sl} (K), k_{sl} (W/mK) y α_{sl} (m²/s) son la conductividad y difusividad térmica del suelo, respectivamente y t (s) es el tiempo transcurrido desde el inicio del vertido. Combinando las ecuaciones 2.24 y 2.26 se obtiene el caudal másico específico de evaporación:

$$\dot{m}^* = \frac{k_{sl}(T_{sl} - T_l)}{\Delta H_{vap} \sqrt{\pi\alpha_{sl}t}} \quad (2.27)$$

donde se observa la disminución progresiva de \dot{m}^* conforme aumenta el tiempo.

La ecuación 2.26 está deducida a partir de la ley de Fourier aplicada a un medio semi-infinito, pero, en la práctica, dado que el suelo se enfría muy rápidamente, la transmisión de calor a través de este sustrato llega a ser irrelevante a partir de tiempos pequeños (incluso menos de un minuto). Entonces el líquido deja de ser burbujeante y el fenómeno pasa a estar controlado por la transferencia de materia (ecuación 2.25) aunque debe tenerse presente el necesario y simultáneo aporte térmico exterior (que en esta segunda fase es predominantemente convectivo y radiante).

Si se trata de un líquido “no hirviente” el vertido se extiende y se evapora con mayor lentitud que en el caso anterior. El caudal de emisión está controlado en todo momento por la transferencia de materia. Si la temperatura inicial del líquido vertido es superior a la ambiental, tiene poca influencia en el flujo evaporado, dado que el calor sensible que se invierte en la evaporación es siempre pequeño comparado con el calor latente necesario para el cambio de fase.

En la figura 2.6 se representa genéricamente los caudales máscicos específicos evaporados en las diferentes etapas citadas.

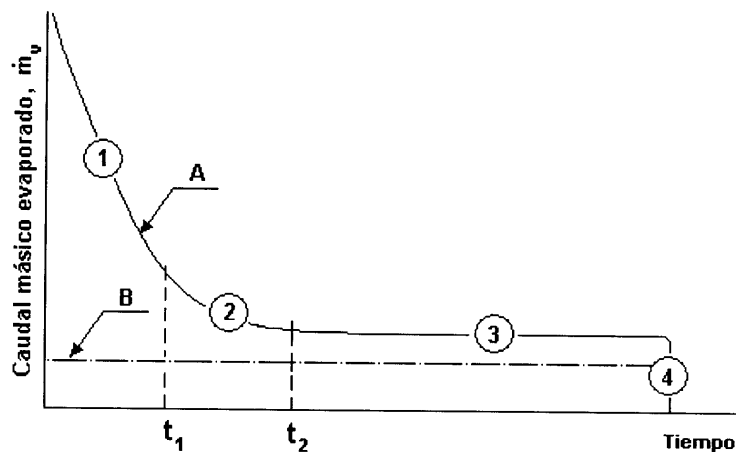


Figura 2.6. Evolución de los caudales máscicos evaporados desde un charco. A: para un líquido “hirviente”. B: para un líquido “no hirviente”. La fase 1 está controlada por la transferencia de calor desde el suelo, la 2 es de transición, la 3 y el caso B están controlados por la transferencia de materia.

- **Las características del suelo.** Si el líquido es “hirviente” las propiedades térmicas del suelo (k_{sl} y α_{sl}) juegan un importante papel en la evaporación, tal y como se observa en la ecuación 2.26. Así, el acero tiene valores de k_{sl} y α_{sl} 45 y 12.7 veces mayores que los correspondientes al hormigón –Santamaría (1994)–, lo que provoca que el caudal máscico inicialmente evaporado sea 12 veces mayor en el primer caso (ver ecuación 2.27). También la permeabilidad del terreno es importante dado que al penetrar el líquido en el interior aumenta la superficie de contacto, lo que favorece la transferencia de energía inicial.

Por el contrario, las características del suelo afectan poco a la evaporación de los líquidos “no hirvientes”, exceptuando la permeabilidad; si es elevada el líquido penetra en el subsuelo, pudiendo afectar a otros elementos ambientales importantes (acuíferos).

- **La disponibilidad de cubetos** junto con el tipo de líquido (“hirviente” o no) y la duración de la fuga (instantánea o continua) condiciona la extensión y la tipología de la emisión. Teniendo en cuenta los comentarios anteriores, pueden deducirse los comportamientos emisivos derivados de las diferentes combinaciones de los elementos citados. Así, si se trata de un líquido “hirviente”, vertido de forma instantánea en una zona no confinada (sin cubeto), el fluido se extiende rápidamente y el frente sufre una intensa evaporación al progresar sobre el suelo, que suele estar a

temperatura más elevada que la del líquido. El espesor de la capa del líquido remanente es pequeño, produciéndose su rápida evaporación y la formación de una nube de corta duración, prácticamente “instantánea”.

Por el contrario, si el mismo tipo de vertido se lleva a cabo en una zona con cubeto, la secuencia inicial es igual a la anterior, hasta que el frente del líquido alcanza las paredes del cubeto, entonces el suelo se enfría y el proceso de evaporación pasa a estar condicionado por la transferencia de materia. Como consecuencia de ello, se forma una nube constituida en su primera parte por una elevada masa (la inicialmente evaporada) seguida por una emisión continua, cada vez más pequeña, procedente del líquido “estabilizado” en el cubeto.

Es fácil deducir que los líquidos “no hirvientes” conducen siempre a la formación de nubes continuas, sea cual fuere el régimen de fuga y la existencia o no de cubeto. La extensión no contenida (sin cubeto) aumenta la superficie y, por consiguiente, favorece la evaporación.

- **Las condiciones atmosféricas**, fundamentalmente la velocidad del viento, la temperatura y la radiación solar influyen en las transferencias de calor y materia. La velocidad del viento influye en los coeficientes de transferencia de calor y materia; la temperatura aumenta la presión de vapor de la sustancia y la radiación solar (que en nuestras latitudes puede alcanzar entre 500 y 1000 W/m² a mediodía en los meses de enero y julio, respectivamente) contribuye a la transferencia de calor.

2.5. PARÁMETROS METEOROLÓGICOS QUE INFLUYEN EN LA MEZCLA Y DISPERSIÓN DE LAS EMISIONES

En los apartados anteriores se ha puesto de manifiesto la importancia de la dinámica atmosférica en la mezcla del aire con las emisiones accidentales que dan origen a las nubes aquí estudiadas. También se ha comentado brevemente la evolución posterior como consecuencia de la continuada entrada de aire y la simultánea dispersión, teniendo en cuenta antes la etapa transitoria de las nubes densas. Se trata ahora de describir las características meteorológicas que más influyen en los mecanismos anteriores.

La capa de aire más próxima al suelo, denominada *capa límite atmosférica*, cuya altura puede oscilar entre 200 y 1000 m, es, desde el punto de vista fluidodinámico, la más compleja por su interacción con la litosfera e hidrosfera. En ella se producen todos los fenómenos relacionados con la mezcla y dispersión de las nubes que interesan destacar aquí, siendo los parámetros más significativos los siguientes:

La magnitud, dirección y persistencia del viento.

La temperatura y la presión.

La humedad y la pluviosidad.

La radiación solar.

La turbulencia.

Todos estos parámetros están interrelacionados. Así, la radiación solar condiciona la temperatura y ésta la densidad que, a su vez, determina la presión... Pero interesa aquí independizarlos, citando brevemente la influencia de cada uno en los fenómenos estudiados.

La **velocidad del viento** tiene una gran importancia en la dispersión, de manera que, como primera aproximación, la concentración del producto fugado en la dirección del viento y en cualquier punto resulta inversamente proporcional a esta magnitud. La velocidad varía con la altura, aspecto que se trata más adelante al estar relacionado con la turbulencia. Por ello, es necesario referenciar la altura a la que se realiza la medida para obtener con ella valores representativos que servirán para evaluar el movimiento de las emisiones pesadas a ras del suelo o el transporte de las nubes neutras o ligeras.

La **dirección del viento** condiciona la dirección del transporte de las sustancias fugadas y, por consiguiente, su impacto. A nivel de microescala (para extensiones con distancia menores a 1 km) y de mesoescala (entre 1 y 10 km), la topografía, la presencia de obstáculos o la proximidad del mar, influyen considerablemente en la dirección del viento, provocando los efectos valle o montaña-valle, las brisas marinas, las corrientes predominantes en calles y avenidas..., todo ello como consecuencia de variaciones locales de presiones, que, a su vez, están originadas por diferencias térmicas.

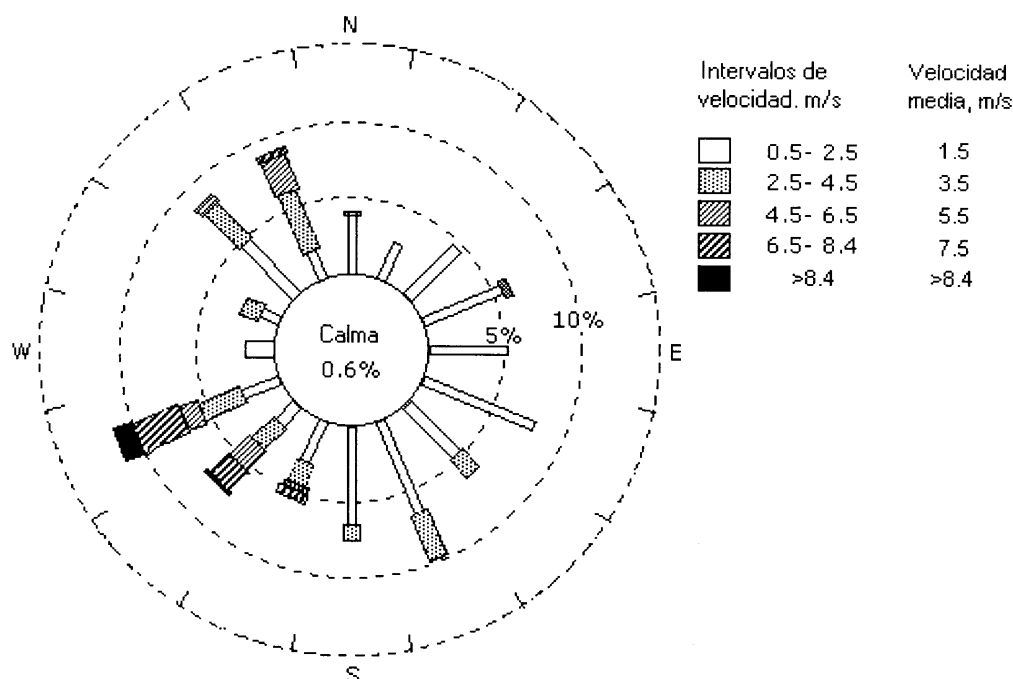


Figura 2.7. Rosa de los vientos. Los círculos representan frecuencias porcentuales.

Se ha adoptado el criterio de representar las direcciones del viento en un diagrama polar denominado *rosa de los vientos*, agrupándolas en 8 o 16 puntos geográficos, siendo este último el utilizado en la figura 2.7. El diagrama informa de las frecuencias a las que se producen dichos parámetros en el lugar considerado y durante un determinado periodo de tiempo, que suele ser mensual o anual. Así, por ejemplo, el intervalo comprendido entre 2.5 y 4.5 m/s en la dirección NNW, que es de donde procede el viento, se verifica durante el 4.5% del periodo medido. La frecuencia de las situaciones de calma (aquellas cuyas direcciones o magnitudes de la velocidad no son detectables por el equipo de medida) deben añadirse para completar la información del periodo evaluado, incluyéndose en la zona central de la *rosa*

de los vientos; en la figura 2.7 la frecuencia de calma es de 0.6% para velocidades de aire inferiores a 0.5 m/s. La dirección predominante en el ejemplo es la WSW, con una frecuencia aproximada del 12%; por consiguiente, el impacto de una hipotética emisión presenta la mayor probabilidad de producirse en la zona situada al ENE del origen del accidente, que es la opuesta a la anterior.

La **persistencia** del viento expresa el número de ocasiones que en periodos determinados (1, 7, 13, ...horas) la dirección del viento permanece estable, en cada uno de los sectores definidos por las direcciones geográficas. Este parámetro es de interés para prever los probables cambios de dirección del viento que influyen de la misma manera en la dirección de la nube y, por consiguiente, en las posibles localizaciones de los impactos.

La **temperatura** ambiente influye en la cinética de las reacciones de transformación de las sustancias fugadas en aire, acelerando generalmente estos procesos. Algunos parámetros o mecanismos de interés dependen de la temperatura, como la densidad del aire y de la nube, la presión de vapor, que hace aumentar la evaporación desde los charcos, los coeficientes de transferencia de calor y de materia...

La **presión** atmosférica a nivel de suelo está relacionada con la estabilidad. A escala sinóptica (para distancias superiores a 100 km) se producen dos grandes movimientos rotacionales provocados por diferencias térmicas en grandes extensiones litosféricas e hidrosféricas y las fuerzas de Coriolis: las borrascas, caracterizadas por presiones inferiores al valor normal (1013 milibares), que determinan la inestabilidad atmosférica, y los anticiclones o zonas de altas presiones que condicionan las situaciones de estabilidad. Estas circulaciones están generalmente alternadas y configuran movimientos de aire que en un plano vertical pueden representarse como se indica en la figura 2.8, de manera que la circulación a nivel de suelo va desde las zonas de altas presiones a las de bajas, ascendiendo en ellas, y en las capas altas el movimiento es contrario, descendiendo en las zonas de altas presiones. Al ascender el aire en los centros de las borrascas se enfría, condensando el vapor de agua, lo que provoca el aumento de nubosidad, característico de las situaciones inestables. El aire una vez seco circula hacia las zonas anticiclónicas, lo que justifica la ausencia de pluviosidad en dichas zonas.

La **humedad** provoca la formación de aerosoles líquidos cuando el producto fugado es higroscópico (amoníaco, cloruro amónico, cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno,...) y puede transformar las nubes ligeras en pesadas al aumentar la masa molecular. También influye en los procesos de transformación atmosféricos, al actuar como intermedio o reactante.

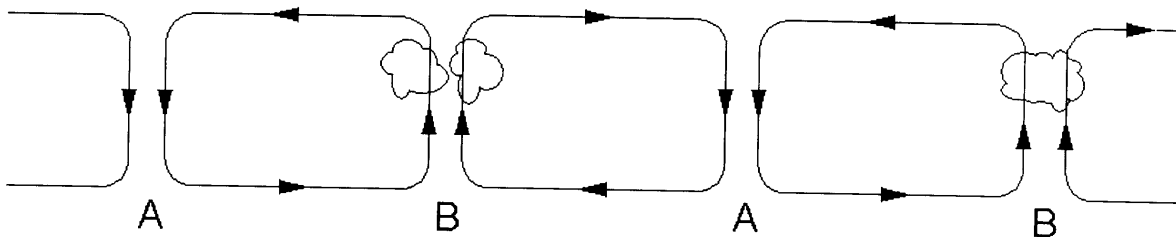


Figura 2.8. Idealizaciones a escala sinóptica de los movimientos del aire en un plano vertical en los anticiclones (A) y en las borrascas (B), observándose la formación de nubosidad en la segunda de las zonas citadas.

La **pluviosidad** es el meteoro más importante desde el punto de vista de la eliminación de los contaminantes atmosféricos, incluso para los productos insolubles, dado que el concepto de “insolubilidad” es relativo. Así, la presencia en aire de sustancias consideradas insolubles, tales como los hidrocarburos volátiles, disminuye muy significativamente tras un episodio lluvioso.

Como es sabido, la **radiación solar** es el fenómeno primario más importante que dinamiza los movimientos de la atmósfera y, además, propicia las reacciones fotoquímicas atmosféricas que son las más importante en cuanto a la transformación de los contaminantes; la información sobre este tema es muy amplia, entre la que cabe destacar las publicaciones de *Finlayson y Pitts (1986)* y *Hewitt (1999)*.

La **turbulencia atmosférica** es el mecanismo más importante, influyendo de forma decisiva en la mezcla y dispersión de las emisiones accidentales. Se trata de movimientos complejos donde intervienen la mayoría de los parámetros anteriores. Ambas cuestiones, importancia y complejidad, aconsejan llevar a cabo un estudio más amplio, incluido a continuación.

2.5.1. La turbulencia del aire

En cualquier fluido, la turbulencia puede definirse como las fluctuaciones continuas y aleatorias de la velocidad, tanto en dirección como en magnitud, que originan movimientos circulares internos (remolinos) que provocan la mezcla del propio fluido o con otros componentes.

La teoría de la turbulencia aplicada a la capa de aire más próxima al suelo se debe a *Sutton (1953)* y *Pasquill (1962)*, desarrollada a partir del comportamiento de los fluidos en contacto con superficies sólidas (tuberías, canales...), de donde surge la denominada *Teoría de la capa límite*, propuesta por *Prandtl (1933)* y *Schlichtling (1936)*.

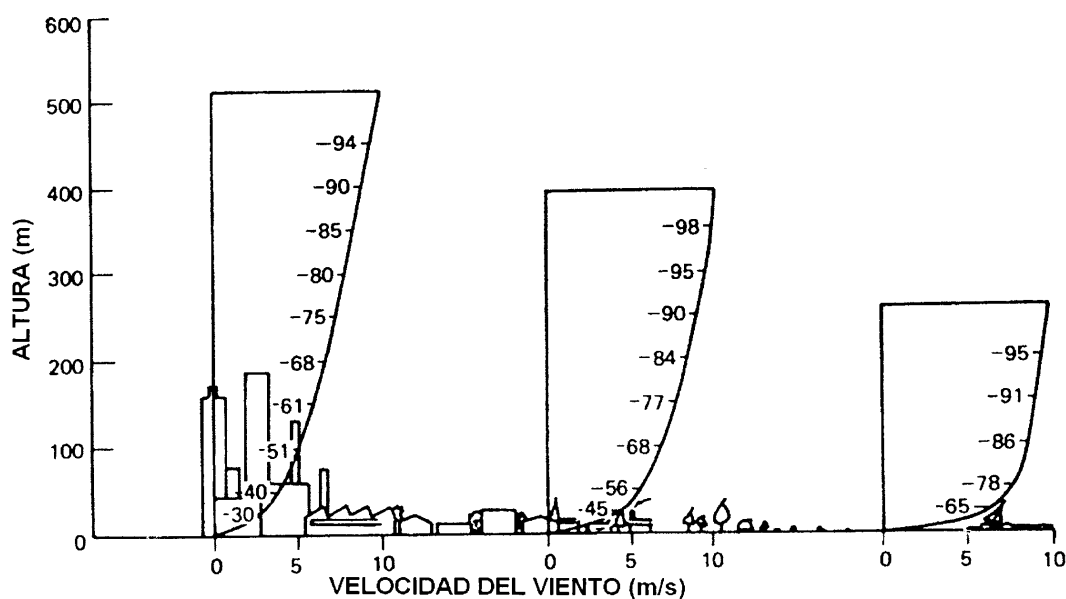


Figura 2.9. Perfiles de velocidades del viento sobre el suelo en función de los obstáculos presentes
—Davenport (1936)—.

En el aire, la turbulencia tiene dos orígenes: mecánico y térmico.

El **origen mecánico** se comprende al analizar el comportamiento del aire que se mueve sobre el suelo –figura 2.9–, observándose la formación permanente de un gradiente de velocidad. Dependiendo de los obstáculos del suelo y de otros parámetros que se comentan más adelante, la velocidad del viento por debajo de los primeros 200-500 metros disminuye progresivamente y es nula en la superficie del suelo.

Según lo anterior, debe aceptarse la actuación de una fuerza de rozamiento, F_R , paralela al suelo y con dirección contraria al movimiento, que es la responsable del efecto de “frenado” del aire provocado por el suelo. Dicha fuerza se transmite verticalmente a toda la capa donde se manifiesta el gradiente de velocidad citado.

Cuando la velocidad es pequeña, y en ausencia de otros efectos, el aire se mueve horizontalmente sin apenas distorsiones, en forma de “láminas”, de ahí la denominación de comportamiento o régimen laminar. En este caso, la fuerza de rozamiento por unidad de área de las “láminas” citadas, F_R/A , denominado esfuerzo cortante, τ , está relacionada con el gradiente vertical de velocidad, du/dz , mediante:

$$\frac{F_R / A}{\rho_a} = \frac{\tau}{\rho} = \nu \frac{du_f}{dz} \quad (2.28)$$

donde ρ_a y ν son la densidad y viscosidad cinemática del aire en la zona considerada.

Conforme crece la velocidad, las “láminas” se distorsionan, se rompen y se mezclan, formándose los remolinos característicos de la turbulencia. Entonces la ecuación 2.28 se transforma en la siguiente:

$$\frac{F_R / A}{\rho_a} = \frac{\tau}{\rho_a} = (\nu + K_r) \frac{du_f}{dz} \quad (2.29)$$

donde K_r se denomina viscosidad turbulenta o de remolino, cuyo valor es mucho mayor que ν , de manera que esta última llega a ser irrelevante:

$$\frac{F_R / A}{\rho_a} = \frac{\tau}{\rho_a} \approx K_r \frac{du_f}{dz} \quad (2.30)$$

El cociente $(\tau/\rho_a)^{1/2}$ tiene dimensiones de velocidad, y, por ello, recibe la denominación de **velocidad de fricción**, u_* , que es un parámetro utilizado para definir otras características fluidodinámicas del aire, comentadas más adelante. Así pues, teniendo en cuenta la ecuación 2.29, se verifica:

$$u_*^2 = \frac{\tau}{\rho_a} = (\nu + K_r) \frac{du_f}{dz} \quad (2.31)$$

En terreno llano, la velocidad de fricción tiene un valor próximo a la décima parte de la velocidad media a 10 metros del suelo y crece al aumentar el número y altura de los obstáculos (árboles, estructuras, edificios...).

Conforme aumenta u_* lo hace también la turbulencia y, por consiguiente, la intensidad de la mezcla asociada a ella. Dada la relación de u_* con du/dz , interesa disponer de expresiones que permitan determinar este último parámetro, siendo los modelos potencial y logarítmico los más utilizados.

El perfil potencial está expresado mediante:

$$u_{az} = u_{azref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \tag{2.32}$$

donde u_{az} es la velocidad a la altura z , y u_{azref} es la velocidad a una altura de referencia, z_{ref} , por ejemplo, aquella donde se sitúa el anemómetro que mide dicha velocidad. El exponente p depende de la clase de estabilidad atmosférica de Pasquill (comentada más adelante). En la tabla 2.2 se indican los valores encontrados experimentalmente por Hanafusa, Lee y Lo (1986).

TABLA 2.2. Valores del exponente p de la expresión potencial de la velocidad del viento, en función de las clases de estabilidad atmosférica de Pasquill

Clase	p	Clase	p
A	0.33	D ó E	0.38
B	0.26	F	0.42
C	0.20	G	0.57

El perfil de velocidad logarítmico viene dado por la expresión siguiente:

$$u_a = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_0} + \alpha \frac{z - z_0}{L} \right] \tag{2.33}$$

válida para condiciones sub o superadiabáticas, pero no aplicable a la situación neutra, donde:

L : Longitud de Monin-Obukhov, definida más adelante, m.

κ : constante de von Karman (0.4).

α : parámetro de ajuste.

z_0 : “longitud de rugosidad”, m.

La “longitud de rugosidad” es un parámetro que sirve para definir la influencia de los obstáculos del terreno en el perfil de velocidad y, por consiguiente, en la turbulencia. Se han

publicado diferentes valores de z_0 , indicándose en la tabla 2.3 los propuestos por *Pasquill y Smith (1983)*. *Holtslag (1987)* proporciona una relación más amplia.

TABLA 2.3. Valores de la “longitud de rugosidad”, z_0 , propuestos por *Pasquill y Smith (1983)*

Elementos superficiales	z_0 (m)
Terreno llano sin vegetación	10^{-3}
Terreno llano con hierba menor de 10 cm	10^{-2}
Terreno llano con hierba mayor de 10 cm	$3 \cdot 10^{-2}$
Terreno agrícola complejo	0.2
Ciudad o bosques	1.0

En definitiva, la turbulencia de origen mecánico está provocada por la velocidad horizontal del aire, su interacción con el suelo y la geometría, distribución y altura de los obstáculos presentes.

La **turbulencia de origen térmico** provoca los movimientos verticales del aire. Algunos ejemplos ayudan a comprender los mecanismos primarios que dinamizan o impiden estos movimientos:

- Durante un día sin nubosidad y con elevada radiación solar, la energía recibida en la superficie terrestre supera a la emitida al exterior por ésta, lo que provoca el progresivo calentamiento de la litosfera o hidrosfera. El aire, que casi no absorbe las energías radiantes intercambiadas (la visible desde el sol y la infrarroja desde la Tierra), se calienta principalmente por contacto con los elementos de la superficie, lo que provoca la disminución de la densidad de las capas más bajas, generando corrientes ascendentes –convección–, que son compensadas por otras descendentes más frías. La zona vertical donde se produce este doble movimiento se conoce como “capa de mezcla”. Esta situación atmosférica se denomina *inestable o superadiabática*; la temperatura alcanza el valor más elevado a nivel de suelo y disminuye más de $1 \text{ }^\circ\text{C/hm}$.
- La situación opuesta a la anterior, se produce durante las noches sin nubosidad y con vientos ligeros. En este caso, dado que la energía recibida por el suelo es prácticamente nula, sólo se produce emisión energética (desde la superficie al espacio exterior) y como consecuencia de ello la superficie terrestre se enfría (de forma más rápida y acusada en la litosfera que en la hidrosfera), lo que provoca el enfriamiento del aire más próximo al suelo, aumentando su densidad. El enfriamiento progresa verticalmente en el transcurso de la noche, originándose un perfil de temperatura creciente que estratifica la densidad, lo que limita los movimientos verticales del aire. La zona donde se verifica este comportamiento “inverso” al que suele producirse durante el período diurno se denomina *capa de inversión*. Este planteamiento no debe llevar a la creencia de que la situación descrita es infrecuente; todo lo contrario, generalmente se verifica en la mayoría de los períodos nocturnos y durante las primeras y últimas horas de los períodos diurnos. Este comportamiento es un

caso particular de la denominada categoría subadiabática, que se produce cuando el gradiente vertical de temperatura es superior a -1°C/hm .

Los dos ejemplos anteriores facilitan la descripción de la denominada atmósfera estándar o adiabática, que es una situación intermedia a las comentadas en los ejemplos anteriores, y sirve de referencia para establecer las diferentes categorías o clases atmosféricas. Cuando el balance energético en la superficie litosférica o hidrosférica de la zona evaluada está compensado, de manera que el flujo energético recibido por la superficie es similar al emitido por ella, el perfil vertical de la temperatura del aire se aproxima al que se produciría en un proceso adiabático.

Este comportamiento se comprende mejor mediante el modelo de “globo adiabático”, que determina la evolución de la temperatura de un volumen de aire (“globo”) que se hace ascender o descender en la atmósfera sin intercambiar energía con el entorno, esto es, siguiendo un proceso “adiabático”. Considerando el aire como un gas perfecto, se demuestra que la temperatura interior disminuye cuando el “globo” asciende, debido a la expansión producida por la disminución de la presión atmosférica con la altura, ocurriendo lo contrario si el “globo” desciende. En estas condiciones el gradiente térmico interior es constante, y si asciende es próximo a -1 K/hm (estrictamente -0.98 K/hm), siempre que no se verifiquen procesos de condensación del vapor de agua. En las situaciones reales el aire contenido en el “globo” tiene siempre cierto nivel de humedad y al ascender y enfriarse alcanzará la temperatura de rocío; entonces el agua condensa y cede el correspondiente calor latente a la propia masa de aire del “globo”, lo que hace que el perfil térmico adiabático “húmedo” sea menos pronunciado que el “seco”, acercándose a un valor medio de -0.65 K/hm .

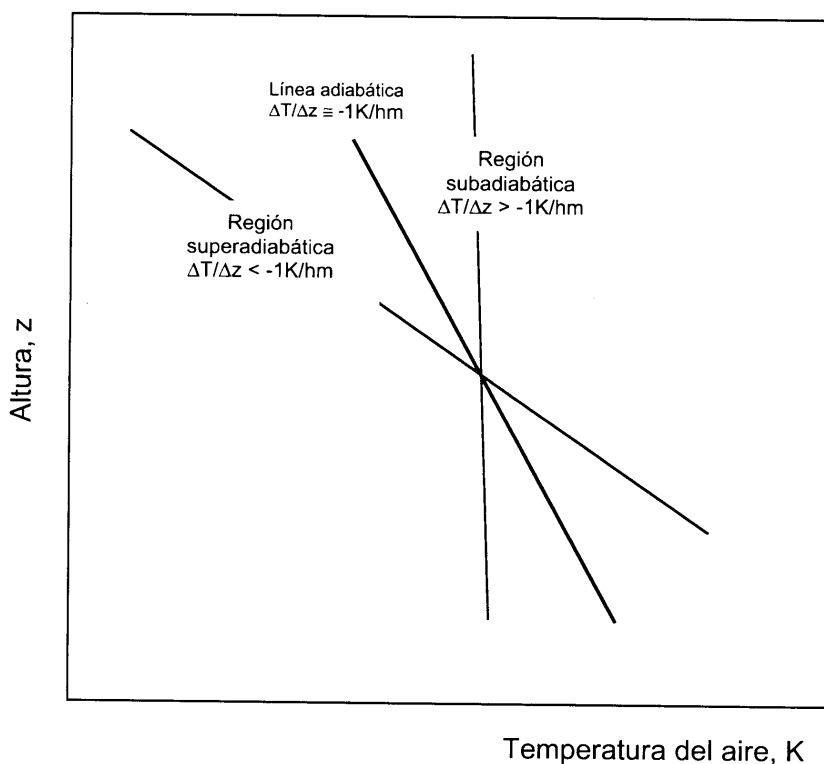


Figura 2.10. Perfiles neutro (adiabático), inestable (superadiabático) y estable (subadiabático).

Las situaciones atmosféricas más frecuentes corresponden a la adiabática descrita, que separa a las otras dos categorías, subadiabática y superadiabática, representadas en la figura 2.10.

En la mayoría de las ocasiones, los perfiles de temperatura reales son mixtos, como los representados en la figura 2.11.

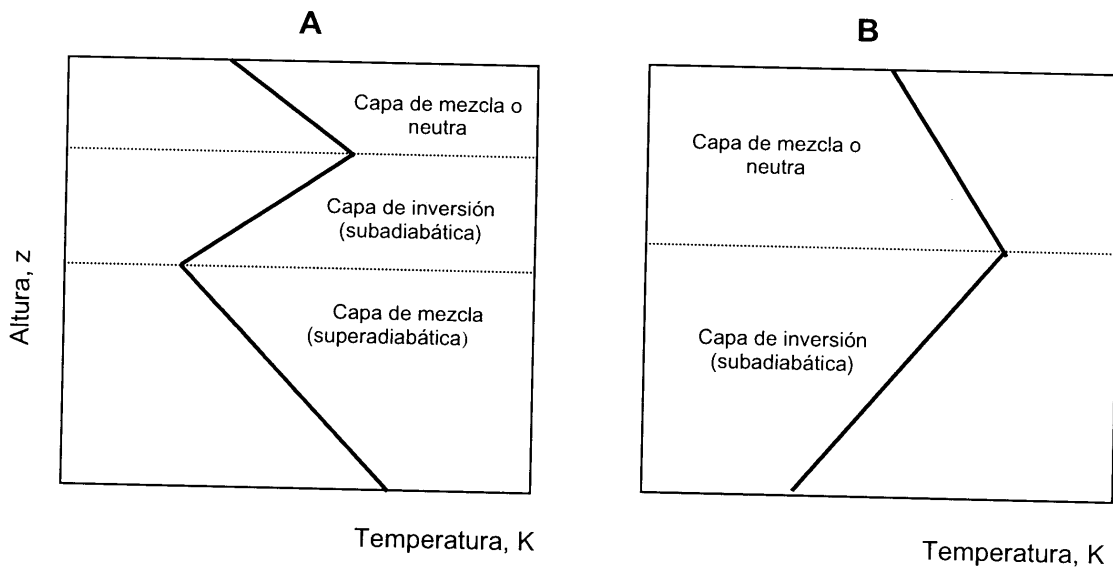


Figura 2.11. Ejemplos de perfiles térmicos atmosféricos mixtos. A: Situación típica diurna. B: Situación típica nocturna.

Conviene ahora definir dos parámetros muy utilizados en meteorología para establecer la categoría de la atmósfera: la **variación adiabática seca de temperatura**, Γ , y la **temperatura potencial**, θ .

El **parámetro Γ** es una constante de valor $+0.01 \text{ K/m}$, que, como puede observarse, es positivo, lo que de acuerdo con *Lees (2001)* se presta a confusión si se identifica con el gradiente térmico adiabático seco (-0.01 K/m). Para un gas perfecto Γ está relacionado con el coeficiente de expansión adiabático reversible (γ) y la masa molecular (M_a), mediante:

$$\Gamma = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{g}{R} M_a \quad (2.34)$$

Asignando los valores de γ y M_a del aire, 1.4 y 29 g/mol, respectivamente, se obtiene el valor de Γ antes citado.

La **temperatura potencial** en un determinado punto, θ , se define como la que adquiere una pequeña masa de aire cuando se lleva adiabáticamente desde dicho punto (caracterizado por la temperatura T_i y la presión P_i), hasta otro, considerado como referencia, cuya presión es P_{ref} , tomada habitualmente a nivel del suelo. En estas condiciones, la transformación adiabática reversible (isoentrópica), se expresa mediante:

$$\theta_1 = T_1 \left(\frac{P_{ref}}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (2.35)$$

Este parámetro sirve de referencia para clasificar la categoría atmosférica, como se indica en la figura 2.12: en ella se ha representado la temperatura potencial del punto 1, θ_1 , y se compara con posibles temperaturas en el punto de referencia (T_{ref}), verificándose:

Si $\theta_1 = T_{ref(1)}$ la categoría atmosférica es neutra (adiabática)

Si $\theta_1 = T_{ref(2)}$ la categoría atmosférica es inestable (superadiabática)

Si $\theta_1 = T_{ref(3)}$ la categoría atmosférica es estable (subadiabática)

En la figura se ha representado también una situación de inversión térmica ($T_{ref(4)}$), donde $T_1 > T_{ref(4)}$.

La temperatura potencial es fácil de calcular a partir de T_1 , z_1 y z_{ref} . En efecto, teniendo en cuenta la figura 2.12 y el carácter adiabático de la temperatura potencial, se verifica:

$$\theta_1 = T_1 + \Gamma(z_1 - z_{ref}) \quad (2.36)$$

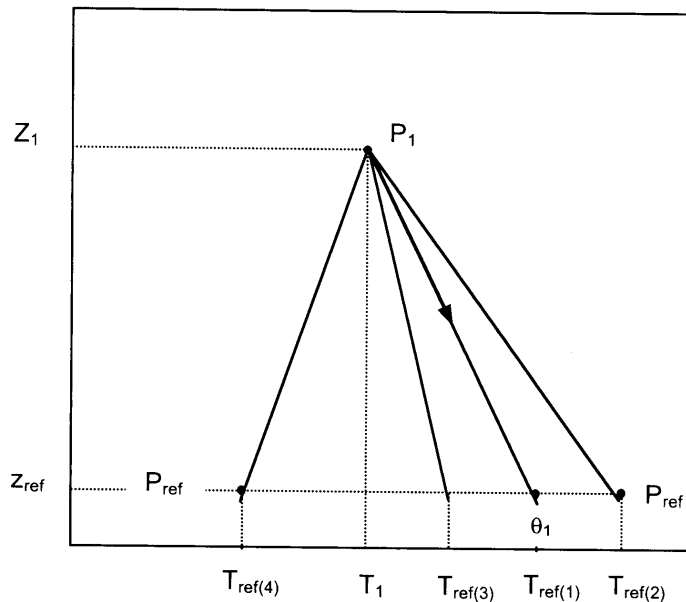


Figura 2.12. Comparación de la temperatura potencial en el punto 1, θ_1 , con posibles temperaturas de la referencia z_{ref}

En definitiva, la **turbulencia térmica** está condicionada por el perfil vertical de temperatura, produciéndose cuando éste es inferior a -1K/hm .

2.5.2. Criterios para establecer la dinámica atmosférica

Los procesos mecánicos y térmicos antes citados son simultáneos y según sus respectivas contribuciones condicionan la génesis y nivel de la turbulencia atmosférica. Por ello, sería de interés disponer de criterios cuantitativos que combinen parámetros de ambos mecanismos, de tal manera que permitan discernir el tipo de régimen existente (laminar o turbulento). En este sentido, los **número de Richardson** y la **Longitud de Monin-Obukhov** son los más utilizados para esta finalidad.

Richardson (1920 y 1925) propuso varios módulos adimensionales, siendo los más empleados los siguientes:

$$\text{Número de Richardson de gradiente: } Ri = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta/dz}{\left(du_a/dz\right)^2} \quad (2.37)$$

En esta expresión el parámetro $(g/\theta)/(d\theta/dz)$ establece la influencia del mecanismo térmico y $(du_a/dz)^2$ la del mecánico, proponiendo un $Ri=1$ para establecer la frontera entre el régimen laminar ($Ri < 1$) y el turbulento ($Ri > 1$). Posteriormente, **Obukhov (1971)** evaluando la aportación de diversos investigadores, deduce valores distintos de Ri , lo que justifica la incertidumbre que afecta a este ámbito.

$$\text{Número de Richardson global (bulk): } Ri_B = \frac{g}{T} \frac{\Delta\theta/\Delta z}{u_a^2} \bar{z}^2 \quad (2.38)$$

En este caso, se procede a la medida de θ en los puntos z_1 y z_2 y se determina $\Delta\theta$ y Δz ; el valor de \bar{z} es la media geométrica de z_1 y z_2 y u y T son las que corresponden a la altura mayor.

$$\text{Número de Richardson modificado: } Ri_M = g \frac{\Delta\rho}{\rho_a} \frac{l}{u_a^2} \quad (2.39)$$

Éste módulo se utiliza para determinar la evolución de las nubes densas en aire, siendo $\Delta\rho$ la diferencia de densidades de la nube y del aire (ρ_a) y l un parámetro característico, denominado *longitud de mezcla*, asociado con el tamaño inicial de la nube.

La **Longitud de Monin-Obukhov**, L , es un módulo que contiene parámetros que definen con mayor representatividad los mecanismos mecánico, a través de u_* , y térmico, mediante el denominado flujo vertical de calor, H_0 :

$$L = \frac{\rho_a C_{pa} T_a u_*^3}{\kappa g H_0} \quad (2.40)$$

siendo ρ_a y C_{pa} la densidad y calor específico del aire y κ la constante de von Karman.

El flujo vertical de calor se obtiene mediante un balance de energía en el suelo, considerando positiva la energía recibida del exterior y negativa la emitida. *Holtslag y van Ulden (1983)* cambian la denominación de H_0 por flujo vertical de calor **sensible**, dado que la presencia de agua en el terreno hace necesario incluir en el balance de energía la fracción de calor absorbida que se invierte en evaporar el agua, sin incrementar la temperatura del suelo, lo que, a su vez, condiciona la temperatura del aire en contacto con él.

Van den Bosch y Weterings (1997) describen un procedimiento detallado para calcular H_0 .

Teniendo en cuenta la ecuación 2.40, se verifica:

Si $H_0 > 0$, lo que implica que la energía recibida es superior a la emitida, el valor de L es positivo y la atmósfera es superadiabática.

Si $H_0 \leq 0$, ocurre lo contrario; L es negativo y la atmósfera es subadiabática.

Si $H_0 \cong 0$, L adquiere un valor muy elevado (teóricamente infinito) y la atmósfera es neutra.

2.5.3. Las clases y las matrices de estabilidad

Las tres categorías de estabilidad atmosférica antes citadas resultan insuficientes para abordar el estudio de la dispersión de los contaminante en el aire, sobre todo para determinar los coeficientes de dispersión, por ello, *Pasquill (1961 y 1962)* propuso ampliar las categorías en seis clases: tres (A, B, C) para la superadiabática, una (D) para la adiabática y dos (E y F) para la subadiabática, relacionándolas con los intervalos de los gradientes térmicos verticales que se indican en la tabla 2.4, donde se incluye también otra clase, G, utilizada por otros autores.

TABLA 2.4. Clases de estabilidad según Pasquill, ampliada con la clase G

CATEGORÍA ATMOSFÉRICA	CLASE	DENOMINACIÓN	GRADIENTE TÉRMICO (K/hm)
Superadiabática	A	Muy inestable	<-1.9
	B	Inestable	-1.9 a -1.7
	C	Ligeramente inestable	-1.7 a -1.5
Adiabática	D	Neutra	-1.5 a -0.5
Subadiabática	E	Ligeramente estable	-0.5 a +1.5
	F	Estable	-1.5 a +4
	G	Muy estable	>+4

Pasquill y Smith (1971) relacionaron las clases de estabilidad de la tabla 2.4 con el *Número de Richardson de gradiente* y con la *Longitud de Monin Obukhov*, como se indica en la tabla 2.5

TABLA 2.5. Relación de las clases de estabilidad según Pasquill con el *Número de Richardson de gradiente (Ri)* y la *Longitud de Monin Obukhov (L)*

Clase de estabilidad de Pasquill	Ri	L
A	-1.0 a -0.7	-2 a -3
B	-0.5 a -0.4	-4 a -5
C	-0.17 a -0.13	-12 a -15
D	0	∞
E	0.03 a 0.05	3.5 a 7.5
F	0.05 a 0.11	8 a 3.5

Por otro lado, *Golder (1972)* combinó el inverso de la *Longitud de Monin-Obukhov* con la longitud de rugosidad superficial, lo que permite delimitar las diferentes clases de estabilidad, tal y como se indica en la figura 2.13.

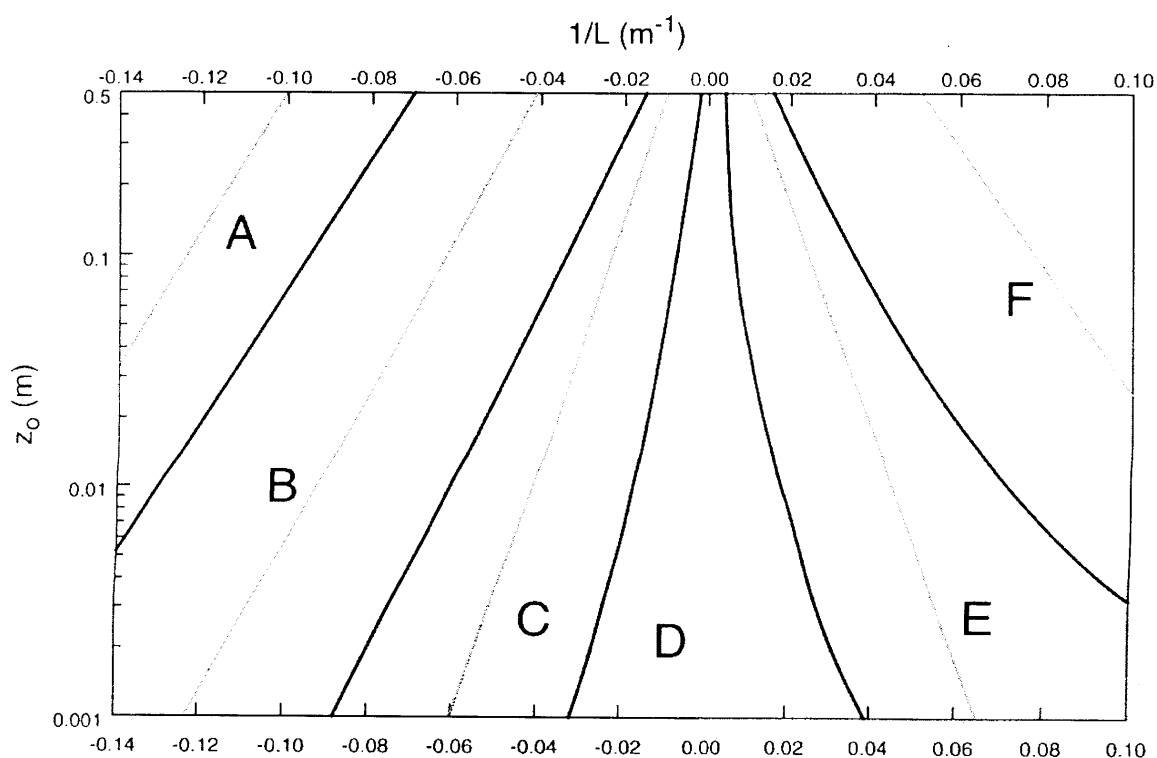


Figura 2.13. Clases de estabilidad en función del inverso de la Longitud de Monin-Obukhov y la longitud de rugosidad superficial, según *Golder (1972)*.

Los métodos para establecer las clases de estabilidad citados hasta ahora y otros no incluidos aquí, necesitan instrumentos especiales o la determinación de parámetros de cierta complejidad. Así, para conocer el perfil de temperatura es necesario disponer de radiosondas que midan simultáneamente temperatura y altura o instrumentos *SODAR* (*Sound Detection And Ranging*, basados en el efecto Doppler), de alto coste. También si se utiliza la *Longitud de Monin-Obukhov* es necesario calcular el parámetro H_0 , que necesita numerosos datos, a veces no fácilmente disponibles. Por todo ello, resultan de gran utilidad otros procedimientos de predicción más sencillos basados en observaciones y parámetros de fácil medida; en este sentido destaca la metodología dada por *Pasquill (1961)*, que permite obtener la clase de estabilidad en función de la velocidad del viento y el nivel de insolación durante el día y del grado de cobertura de nubes durante la noche, tal y como se indica en la tabla 2.6.

TABLA 2.6. Clases de estabilidad de Pasquill en función de la velocidad del viento, nivel de insolación y nubosidad

Velocidad del viento a 10 m del suelo (m/s)	Insolación (Nota 1)			Noche (Nota 2)	
	Fuerte	Moderada	Ligera	Cubierto 4/8 ó más	Cubierto 3/8 ó menos
< 2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Nota 1.- La insolación fuerte es la que corresponde a las horas centrales de los días de verano. La insolación ligera es la que corresponde a las horas centrales de los días de invierno.

Nota 2.- Se entiende por noche el periodo comprendido entre una hora antes de la puesta de sol hasta una hora después de la salida del sol.

Mayor información ofrecen las modificaciones propuestas por *Turner (1961 y 1964)* y *Klug (1969)* que están contenidas en la tablas 2.7 y 2.8, comentadas a continuación:

En el periodo diurno, antes definido, se determina el **índice de radiación neta (IRN)**, que es un parámetro relacionado con el balance energético a nivel del suelo, asignándole valores enteros, desde 0 (para balances compensados, esto es, cuando las energías recibida y emitida son análogas) a 4 (cuando la energía recibida es máxima). Como se indica en la tabla 2.7 el IRN es función de la altura solar, α_s , (ángulo de inclinación del sol respecto a la horizontal, trazado en un plano perpendicular al suelo que contiene al sol y al punto de observación) y de la cobertura de nubes (este último parámetro se expresa como numero de octavos de la superficie del cielo cubierta por la nubes y se determina por observación visual).

TABLA 2.7. Índice de radiación neta durante periodos diurnos

Nubes		Índice de radiación neta (IRN) (α_s = altura solar en grados sexagesimales)			
Cobertura (octavos)	Tipo	$\alpha \geq 60^\circ$	$60^\circ > \alpha > 35^\circ$	$35^\circ > \alpha > 15^\circ$	$\alpha < 15^\circ$
8/8	Bajas	0	0	0	0
>4/8	Altas	3	2	1	1
>4/8	Bajas	2	1	1	1
	medias	3	2	1	1
$\leq 4/8$		4	3	2	1

Para determinar la altura solar se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{sen} \alpha_s = \text{sen} \delta \text{sen} \phi + \text{cos} \delta \text{cos} \phi \text{cos} \omega \quad (2.41)$$

donde todos los ángulos se miden en grados sexagesimales, siendo:

δ : declinación solar, que depende del día y mes del año.

ϕ : latitud geográfica del lugar (positivo en el norte)

ω : tiempo angular. Cero a mediodía (a las 12 hora solar); negativo por la mañana y positivo por la tarde; a cada periodo de hora le corresponde 15° . Así, a las 10 horas le corresponde el ángulo -30° y a las 15 h equivale a $+45^\circ$.

La tabla 2.8 sirve para determinar el IRN durante el periodo nocturno; en este caso los valores pueden ser 0, -1 y -2, en función del nivel de cobertura.

TABLA 2.8. Índice de radiación neta durante el periodo nocturno

Cobertura de nubes	IRN
8/8	0
$\geq 4/8$	-1
$\leq 3/8$	-2

La combinación del IRN con la velocidad del viento a 10 m del suelo permite determinar la clase de estabilidad utilizando la tabla 2.9.

TABLA 2.9. Clases de estabilidad atmosférica en función del índice de radiación neta y de la velocidad del viento

Velocidad del viento a 10 m del suelo, m/s	IRN						
	4	3	2	1	0	-1	-2
Calma	A	A-B	B	C	D	F	F
≥2 a <3	A	B	C	D	D	E	F
≥3 a <5	B	B-C	C	D	D	D	E
≥5 a <6	C	C	D	D	D	D	E
≥6	C	D	D	D	D	D	D

Conocida la *rosa de los vientos* y las clases de estabilidad atmosférica de una determinada zona y para un periodo de referencia (generalmente mensual o anual), se pueden elaborar las denominadas matrices de estabilidad, que informan de la frecuencia a la que se verifican las variables de interés. Se construye una matriz para cada dirección de viento por lo que se dispone de 8 ó 16 matrices, dependiendo de los puntos geográficos de la “rosa de los vientos”. Así, como ejemplo de lo indicado, la tabla 2.10 es una matriz típica de una determinada zona, que en este caso corresponde a la dirección de viento SSW. La información contenida en la matriz es de sumo interés, dado que permite conocer los siguiente parámetros:

1. La frecuencia a la que se verifica cualquier combinación clase de estabilidad-velocidad de viento. Por ejemplo, en la dirección SSW, la clase de estabilidad D combinada con el intervalo de viento 3-5 m/s se presenta con una frecuencia temporal de 1.34%.
2. La frecuencia de cada clase de estabilidad. Así, la clase C en la dirección SSW se verifica el 1.25% del período evaluado.
3. La frecuencia de cada intervalo de velocidad. El intervalo 1-3 m/s en la dirección SSW se produce durante el 0.96% del periodo.
4. La frecuencia total (suma de la última fila o columna) es la que corresponde a la dirección de viento de la matriz. En este caso, durante el 5.99% del tiempo el viento procede de la dirección SSW.
5. Como puede observarse hay varias combinaciones que no se presentan por lo que deben descartarse de los análisis de consecuencias que involucren emisiones tóxicas.
6. La clase D es generalmente la más frecuente. En el ejemplo supera el 50% del periodo considerado.

TABLA 2.10. Ejemplo de matriz de estabilidad, correspondiente a una determinada dirección de viento, en este caso la SSW

V(m/s)	Frecuencias de estabilidades, %						Σ Clases
	A	B	C	D	E	F	
0-1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.15
1-3	0.30	0.07	0.03	0.43	0.00	0.13	0.96
3-5	0.00	0.92	0.47	1.34	0.00	0.00	2.73
5-7	0.00	0.00	0.74	1.01	0.03	0.00	1.78
7-9	0.00	0.00	0.01	0.33	0.00	0.00	0.34
>9	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03
Σ v	0.31	0.99	1.25	3.14	0.03	0.27	5.99

Estas matrices son de gran interés para actuaciones de planificación ante accidentes que generen nubes tóxicas, posibilitando conocer las situaciones más probables y las más desfavorables, que en el ejemplo corresponden a D 4m/s y F 1.5 m/s (media de 0 y 3 m/s), respectivamente.

2.6. LA DISPERSIÓN PASIVA

Como se comenta al comienzo de este capítulo, la mayor parte de las emisiones accidentales de las sustancias tienen una densidad inicial mayor que la del aire originando nubes pesadas, pero la continuada mezcla hace que la densidad de la interfase nube-aire disminuya hasta que las fuerzas gravitatorias son compensadas por las fuerzas de turbulencia atmosférica. En ese momento las nubes adquieren la dinámica del viento y son transportadas y dispersadas por éste. También puede suceder que la sustancia emitida tenga una densidad menor o muy próxima a la del aire, bien por tener baja masa molecular –como ocurre con el monóxido de carbono, el formaldehído, el metanol...– o por producirse la fuga a elevada temperatura, de tal manera que se compensa el efecto de la mayor masa molecular.

Sea cual fuere el caso, la nube se dispersa, antes o después, de forma pasiva, esto es, sin manifestar ninguna dinámica propia que altere o afecte la del aire circundante. Este tema cuenta con una amplia información bibliográfica, aunque la mayoría estudia la evolución de las emisiones a través de chimeneas. No obstante, el ámbito aquí considerado dispone de suficiente información, que, generalmente, sigue los criterios siguientes:

1. Se considera que el origen de la fuga o la zona donde se inicia el comportamiento pasivo de la nube está en o próxima al suelo.
2. Los modelos analíticos para determinar las concentraciones en aire de las sustancias fugadas que gozan de mayor reconocimiento, parten de la ecuación general de la difusión, expresada mediante:

$$\frac{dc}{dt} + u_x \frac{dc}{dx} + u_y \frac{dc}{dy} + u_z \frac{dc}{dz} = k_x \frac{d^2c}{dx^2} + k_y \frac{d^2c}{dy^2} + k_z \frac{d^2c}{dz^2} \quad (2.42)$$

donde:

x, y, z : coordenadas del punto considerado donde se desea determinar la concentración.

u_x, u_y, u_z : velocidades del viento en las direcciones x, y, z , m/s.

k_x, k_y, k_z : coeficientes de difusión de las sustancias en aire en las direcciones x, y, z , m²/s.

c : concentración de la sustancia, mg/m³

t : tiempo, s

Para simplificar, se considera que las velocidades del viento en las direcciones x e y son nulas ($u_y = u_z = 0$), verificándose:

$$\frac{dc}{dt} + u_x \frac{dc}{dx} = k_x \frac{d^2c}{dx^2} + k_y \frac{d^2c}{dy^2} + k_z \frac{d^2c}{dz^2} \quad (2.43)$$

Algunos autores aceptan la igualdad de los coeficientes de difusión en las tres direcciones:

$$k_x = k_y = k_z = k^* \quad (2.44)$$

que sustituido en la ecuación 2.43 se obtiene:

$$\frac{dc}{dt} + u_a \frac{dc}{dx} = k^* \left(\frac{d^2c}{dx^2} + \frac{d^2c}{dy^2} + \frac{d^2c}{dz^2} \right) \quad (2.45)$$

3. Desde el punto de vista cronológico se aceptan dos tipos de emisiones: de corta duración, denominada “instantánea”, y de larga duración, o “continua”.
4. La difusión sigue un **comportamiento Gaussiano**, de manera que la nube se mueve en la dirección predominante del viento, con el valor máximo de concentración en la línea central de la trayectoria, presentando las concentraciones en las direcciones transversales (y, z) distribuciones normales.

Aunque se han publicado diferentes modelos de calculo, *Less (2001)*, los debidos a *Sutton (1953)* y, principalmente, el de *Pasquill-Gifford*, son los más utilizados.

El modelo de *Sutton* parte del propuesto por *Roberts (1923)*, pero sustituye los coeficientes de difusión (k^*) antes citados, por parámetros de difusión (C), mediante

$$C^2 = \frac{4k}{u_a^*} \quad (2.46)$$

e integra la ecuación general simplificada de la difusión (ecuación 2.43), obteniendo: Para nubes “instantáneas”:

$$c(x, y, z, t) = \frac{2m_c}{\pi^{3/2} C_x C_y C_z (u_a t)^{3/2(2-n)}} \exp \left[- (u_a t)^{n-2} \left(\frac{x^2}{C_x^2} + \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2} \right) \right] \quad (2.47)$$

Para nubes continuas;

$$c(x, y, z) = \frac{2\dot{m}_c}{\pi C_y C_z u x^{(2-n)}} \exp \left[-x^{n-2} \left(\frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2} \right) \right] \quad (2.48)$$

donde:

m_c : masa fugada del contaminante, mg.

\dot{m}_c : caudal másico del contaminante, mg/s.

t : tiempo desde el inicio de la fuga.

n : índice de difusión.

Sutton (1953) discute y propone valores de n y C , que dependen de la categoría de estabilidad y C depende también de la altura de la emisión; n está comprendido entre 0 (para alta turbulencia) y 1 (para muy baja turbulencia), siendo el valor más común 0.24 (para la categoría neutra). Los valores más probables de C_y y C_z a nivel de suelo son 0.21 y 0.12, respectivamente.

El modelo de Pasquill-Gifford es el más utilizado. A *Pasquill (1961, 1962)* se le debe el tratamiento analítico y a *Gifford (1961)* la obtención de los coeficientes de dispersión, que en este caso coinciden con las desviaciones típicas de la concentración (σ_x , σ_y , σ_z) en las direcciones x , y , z . Estos coeficientes están relacionados con los utilizados por Sutton mediante:

$$\sigma^2 = \frac{C^2}{2} (ut)^{2-n} \quad (2.49)$$

El modelo aplicado a emisiones instantáneas se expresa de la forma:

$$c(x, y, z, t) = \frac{2m_c}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (2.50)$$

donde x es la distancia al origen de la emisión.

Y para emisiones continuas:

$$c(x, y, z) = \frac{\dot{m}_c}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (2.51)$$

La concentración dada por la ecuación 2.51 es válida si la duración de la fuga es mayor que el tiempo obtenido al dividir la distancia desde la emisión al punto de medida y la velocidad del viento (x/u).

Los coeficientes de dispersión, σ , dependen de la tipología de la fuga –instantánea o continua– y de las características atmosféricas.

Para fugas instantáneas se utilizan los valores dados por *Slade (1968)*, mediante:

$$\text{Para la categoría inestable: } \sigma_x = \sigma_y = 0.14x^{0.92}; \sigma_z = 0.53x^{0.73} \quad (2.52)$$

$$\text{Para la categoría neutra: } \sigma_x = \sigma_y = 0.06x^{0.92}; \sigma_z = 0.15x^{0.70} \quad (2.53)$$

$$\text{Para la categoría muy estable: } \sigma_x = \sigma_y = 0.024x^{0.89}; \sigma_z = 0.05x^{0.61} \quad (2.54)$$

(Como puede observarse no se distinguen las clases de estabilidad en cada categoría).
Para fugas continuas, *Turner (1970)* propuso las relaciones gráficas de la figuras 2.14 y 2.15, donde se distinguen las diferentes clases atmosféricas.

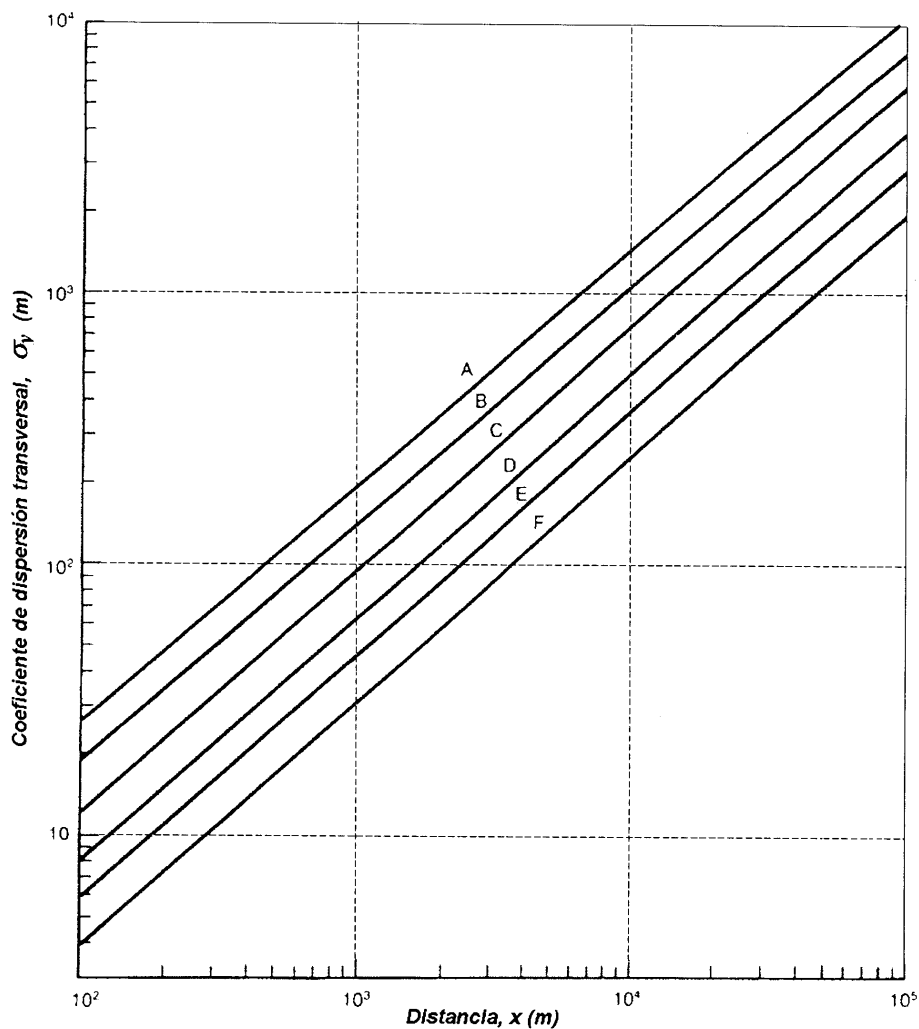


Figura 2.14. Coeficiente de dispersión transversal, σ_y (m), propuesto por *Turner (1970)*.

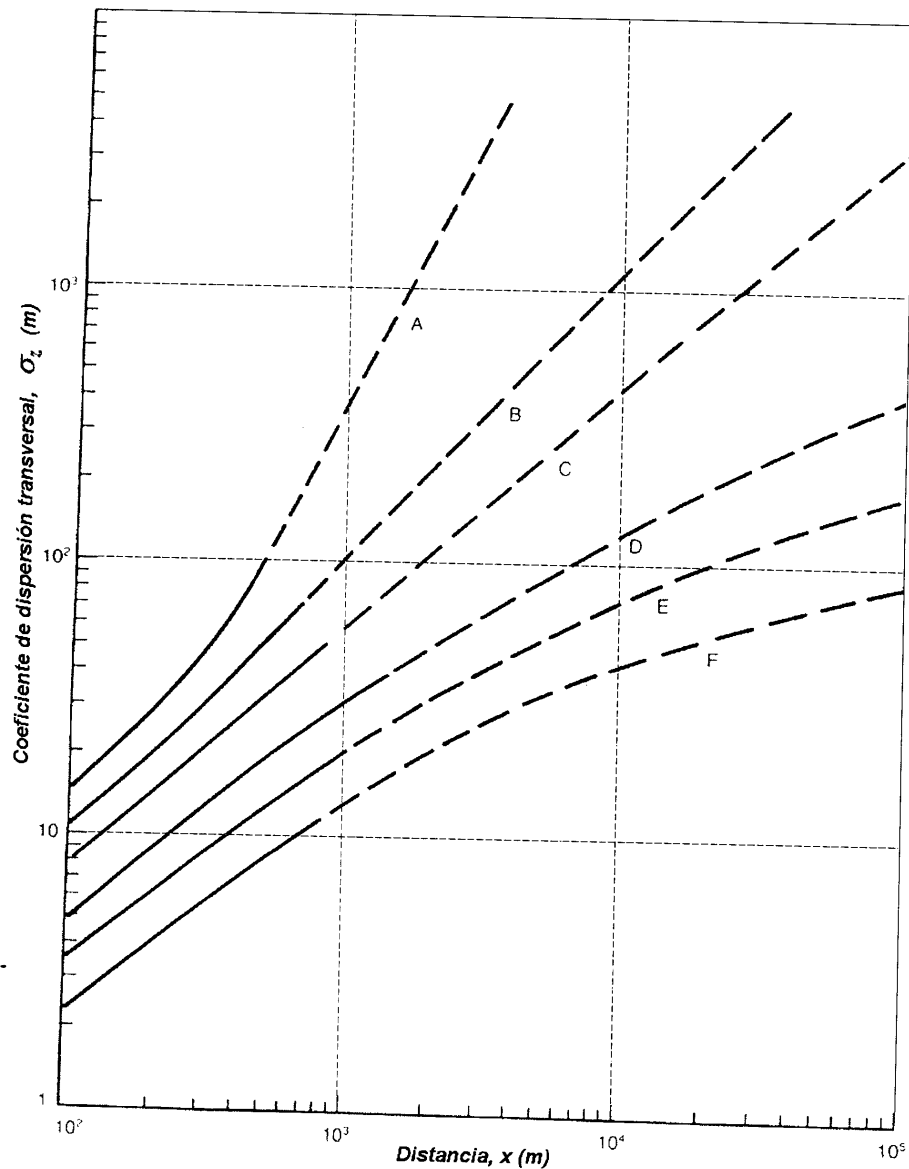


Figura 2.15. Coeficiente de dispersión vertical, σ_z (m) propuesto por Turner (1970).

Como se observa en la figura 2.15 las relaciones $\sigma_z = f(x)$ se representan con trazos a partir de unos 1000 m debido a la incertidumbre que plantea la posible presencia simultánea y alternada de capas de mezcla e inversión y la complejidad de los movimientos verticales del aire. A partir de las ecuaciones anteriores pueden deducirse diversos casos particulares; así, se obtienen fácilmente las concentraciones a nivel del suelo ($z=0$) o en la trayectoria de la nube ($y=0$).

Turner (1994) discute la incertidumbre asociada a las ecuaciones anteriores y casos especiales que pueden ser de interés en este ámbito, tales como la fumigación provocada en la capa de mezcla en los límites de la capa de inversión, cálculo de dosis de sustancias, influencia de la topografía...

2.7. LAS NUBES DENSAS: COMPORTAMIENTO Y MODELOS PARA SU ESTUDIO

En los apartados anteriores se han citado algunas de las causas que provocan la formación inicial de las nubes densas, interesando ahora concretarlas para a partir de ellas comentar el comportamiento posterior. En definitiva, las nubes densas se producen en los casos o circunstancias siguientes:

1. Cuando la masa molecular de la sustancia fugada es superior a la del aire. La mayoría de los productos de interés industrial tienen esta característica.
2. Si la temperatura de la emisión es inferior a la del aire circundante se incrementa la densidad. Incluso las sustancias con masas moleculares menores a las del aire pueden superar la densidad atmosférica si la disminución térmica es suficientemente importante. Esta situación puede producirse en la expansión de los gases almacenados a presiones superiores a la atmosférica o en la evaporación de gases licuados desde charcos.
3. La capacidad reactiva de algunas sustancias puede dar lugar a otras de mayor masa molecular: este es el caso de las sustancias hidrofílicas que pueden reaccionar con el vapor de agua ambiental. Un fenómeno muy estudiado es la dimerización del fluoruro de hidrógeno que duplica la masa molecular de 20 a 40 kg/kmol.

No obstante, puede ocurrir el fenómeno opuesto, esto es, nubes de sustancias consideradas a priori pesadas por su masa molecular, pueden comportarse como neutras, debido a emisiones a altas temperaturas, tales que la flotabilidad supere los efectos gravitatorios, o si la mezcla con aire es rápida y suficientemente efectiva para que la densidad se aproxime a la del aire. Este es el caso de los jets verticales en condiciones atmosféricas favorables (muy turbulentas).

Desde el punto de vista de los análisis de consecuencias, las nubes densas son más peligrosas que las neutras debido a los comportamientos y circunstancias siguientes:

- La masa de vapor tóxico tiende a permanecer a poca altura (a ras de suelo), que es la posición en la que más comúnmente se encuentran los elementos vulnerables (personas y la mayor parte de los seres vivos), aumentando por tanto el riesgo.
- Si la sustancia es inflamable, la posibilidad de encontrar un punto de ignición es mayor en zonas cercanas al suelo, donde también se producirá la deflagración posterior. Por ambas razones se incrementa el riesgo de impacto térmico (llamarada) y mecánico (explosión).
- La dilución de las nubes densas es más lenta que los gases neutros, por lo que la primera es capaz de recorrer mayores distancias y permanecer durante más tiempo a concentraciones elevadas.

2.7.1. Conexión entre la emisión y la dispersión densa

Dado que el movimiento de la nube en los momentos iniciales está íntimamente influenciado por el modo en el que la emisión se incorpora a la atmósfera, el modelo de

dispersión densa debe estar conectado con el modelo de fuga. En ocasiones, éste último entra a formar parte del primero y en otras, los resultados de uno se introducen como datos de entrada del siguiente.

La rotura catastrófica de un contenedor se modela generalmente considerando que se forma instantáneamente una nube densa e instantánea, con geometría cilíndrica. Una aproximación similar puede usarse para una fuga procedente de un orificio de tamaño intermedio.

La conexión de los modelos que tratan los jet bifásicos que sufren flash con los modelos de dispersión presenta dificultades, aunque se dispone de algunos que permiten una suave transición al modelo de gas denso considerando la fuga como continua en la mayoría de los casos. Así, para los jets procedentes de fugas elevadas sobre el suelo que se adaptan a la dispersión densa se han desarrollado varios modelos, siendo uno de los más conocidos el de *Ooms (1972)*, posteriormente comentado, aunque el mecanismo bifásico no está aún bien resuelto. Algunos determinan el perfil de concentración de la pluma que se abate, incluyendo sus dimensiones y velocidad, permitiendo la conexión con el modelo de dispersión.

La vaporización desde un charco de líquido, puede considerarse a priori como el caso de emisión más sencillo. Sin embargo, tanto el área de evaporación como la transferencia de calor son dependientes del tiempo. En general, el caudal del vapor se trata como una fuga continua idealizada, y rara vez los modelos de dispersión densa son capaces de tratar emisiones de caudales variables.

2.7.2. Modelos de dispersión de gases densos

Como se deduce de lo anteriormente expuesto el modelado global de la dispersión de gases densos es una tarea muy compleja, tanto por la variedad de posibilidades de emisión, como por la necesidad de describir y acoplar diferentes fenómenos físicos entre sí.

Desde el punto de vista cronológico los modelos han evolucionado desde planteamientos muy simples hasta los complejos sistemas de simulación actuales. Una posible clasificación se indica a continuación:

- Modelos convencionales modificados.
- Modelos adimensionales.
- Modelos de semejanza:
 - a. Modelos de semejanza simples, también conocidos como modelos simples de dispersión densa, entre los que destacan los de caja –para fugas instantáneas– y los de plumas abatidas –para emisiones continuas–.
 - b. Modelos de semejanza avanzados, que se desarrollaron a partir de los anteriores.
- Modelos avanzados.

2.7.2.1. Modelos convencionales modificados

Dado que la mayoría de las nubes producidas en las fugas de sustancias de interés industrial tienen un comportamiento denso, la respuesta inicial consistió en intentar adaptar los modelos de dispersión neutra existentes (como los de Sutton y Pasquill-Gifford, antes

citados) a la dispersión densa, por medio de ajustes empíricos en los parámetros de difusión o en los coeficientes de dispersión, dando lugar a los modelos convencionales modificados. Dentro de este grupo destacan los modelos del Departamento de Minas de EEUU –*Burgess y Zabetakis (1973)*–, el modelo de *Clancey (1976)* y el modelo de *Germeles y Drake (1975)*.

Así, el modelo del Departamento de Minas parte de las ecuaciones de Pasquill-Gillford pero modifica los coeficientes de dispersión de los contaminantes en aire suponiendo que σ_z (coeficiente de dispersión vertical) equivale a $0.2\sigma_y$ (coeficiente de dispersión transversal), mientras que para la dispersión pasiva, σ_z es la mitad de σ_y .

El modelo de Clancey parte de la ecuación de *Sutton (1953)* asignando los siguientes valores a los coeficientes de dispersión:

$$\sigma_z = 0.5\sigma_x = 0.5\sigma_y$$

Este intento de modelado de la dispersión de gases densos a partir de los modelos clásicos de dispersión de gases neutros fue rápidamente rechazado al comprobar que los resultados obtenidos no responden adecuadamente a la realidad experimental, sobre todo tras la comprobación llevada a cabo por *Van Ulden (1974)*.

2.7.2.2. Modelos dimensionales

Se desarrolla entonces una nueva generación de modelos basados en las relaciones físicas obtenidas a partir de experimentos de dispersión densa a escala de laboratorio y de ensayos de campo. Resultan así formulaciones simples basadas en relacionar números adimensionales capaces de explicar las observaciones realizadas a la vez que evitan describir detalladamente la fluidodinámica de la nube. Las variables independientes más relevantes en la dispersión son: la velocidad del viento, el volumen inicial de la emisión si la fuga es instantánea, o bien el caudal de emisión si es semicontinua, la anchura de la fuente y la relación de densidades gas-aire. Otras variables como la estabilidad atmosférica, la rugosidad y la geometría de la nube se consideran menos importantes. El número de parámetros a tener en cuenta se reduce considerando únicamente la concentración a nivel del suelo, aceptando que la máxima concentración del contaminante se da en el eje central de la nube (en la dirección del viento), utilizando un nuevo criterio conocido como *aproximación de Boussinesq*. Ésta consiste en agrupar los números adimensionales $u_a^2/(gb_0)$ y ρ_f/ρ_a en el módulo $u_a^2/(g_{\text{eff}} b_0)$ –*Van der Bosch y Weterings (1997)*– donde:

b_0 : parámetro de la forma de la nube.

g_{eff} : gravedad efectiva, definida mediante:

$$g_{\text{eff}} = g \left(\frac{\rho_f - \rho_a}{\rho_a} \right) \quad (2.55)$$

A partir de ensayos experimentales y posterior análisis dimensional, se obtienen correlaciones que permiten determinar la disminución de la concentración del contaminante en la

dirección del viento. Esta metodología ha sido seguida entre otros por *Britter y McQuaid (1988)*, que han obtenido nomogramas para fugas instantáneas y continuas.

El primero (figura 2.16) relaciona los números adimensionales siguientes:

$$\frac{x}{V_o^{1/3}} \quad (2.56)$$

$$\left(\frac{g_{eff} V_o^{1/3}}{u_a^2} \right)^{1/2} \quad (2.57)$$

donde V_o es el volumen inicial fugado. Dicha relación permite determinar el cociente de la concentración máxima a lo largo de la trayectoria (C_{max}) y la concentración inicial de la fuente (C_o).

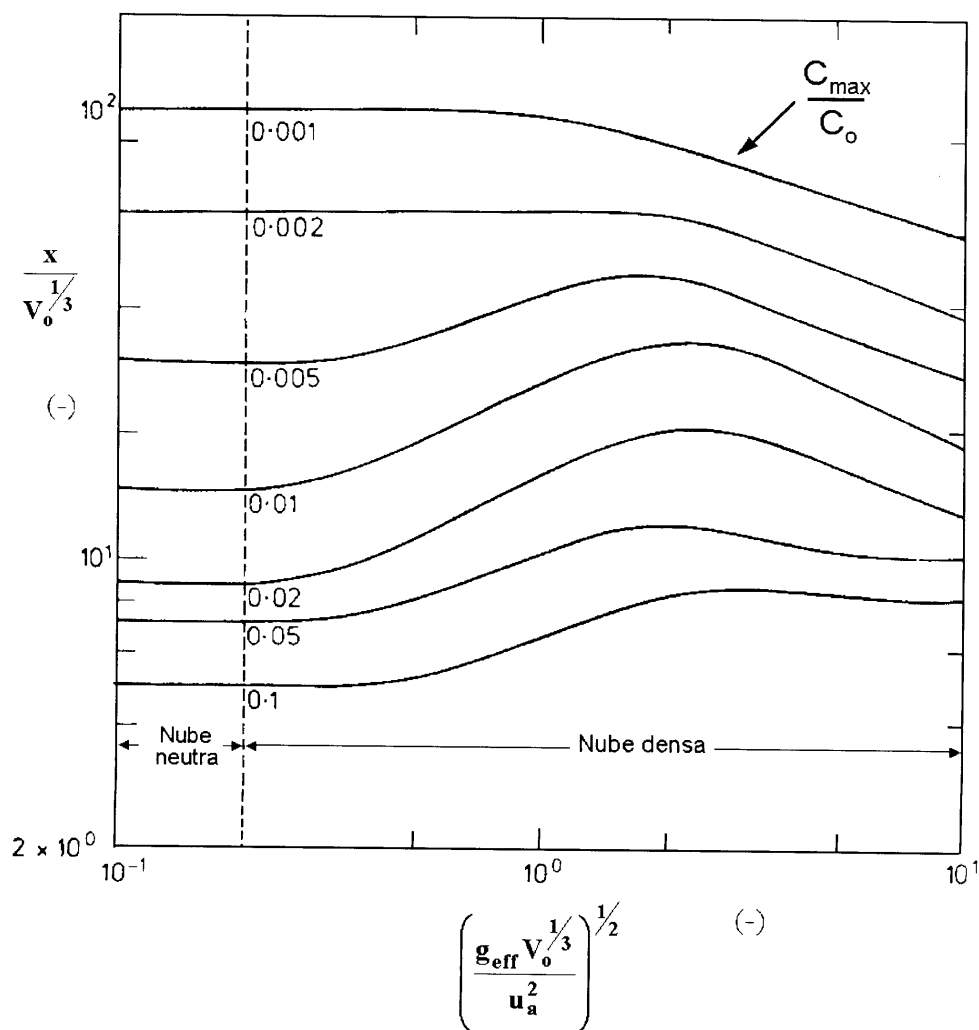


Figura 2.16: Nomograma para fugas instantáneas, de acuerdo con el trabajo de Britter y McQuaid (1988).

Cuando se verifica:

$$\left(\frac{g_{eff} V_o^{1/3}}{u_a^2} \right)^{1/2} \leq 0.14 \tag{2.58}$$

la nube pierde su comportamiento denso; como puede observarse, la menor g_{eff} y la mayor velocidad del viento, u_a , facilitan el comportamiento pasivo.

El nomograma correspondiente a las emisiones continuas, figura 2.17, es muy similar al anterior, pero en este caso los parámetros representan el cociente entre la concentración media o promediada en la dirección del viento (C_{med}) y la concentración en la fuente (C_o). Los números adimensionales se expresan en función del caudal de emisión, Q_o , siendo su expresión la siguiente:

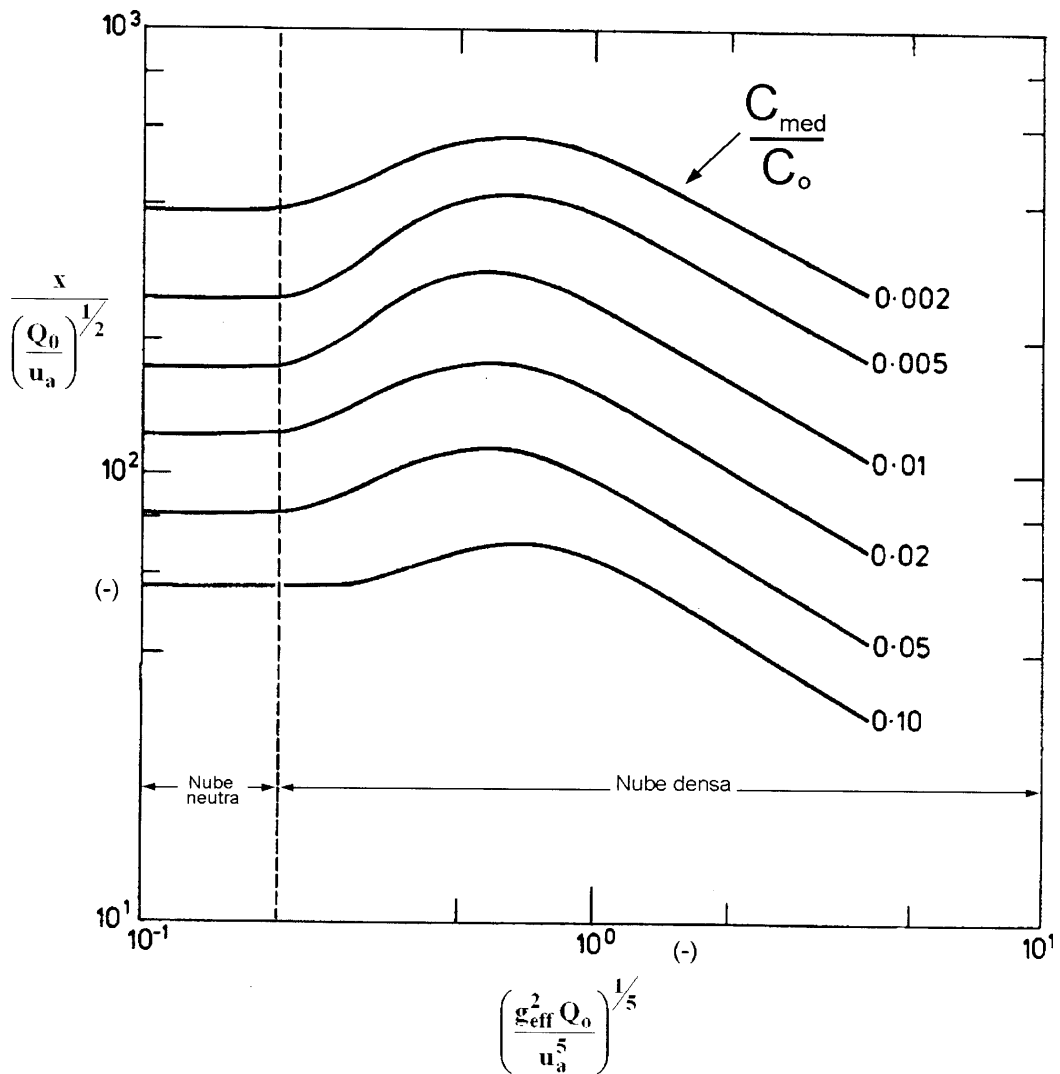


Figura 2.17: Nomograma para fugas continuas, de acuerdo con Britter y McQuaid (1988).

$$\frac{x}{\left(\frac{Q_0}{u_a}\right)^{1/2}} \quad (2.59)$$

$$\left(\frac{g_{eff}^2 Q_0}{u_a^5}\right)^{1/5} \quad (2.60)$$

El límite pasivo se alcanza para valores del módulo adimensional (2.60) iguales o inferiores a 0.41.

2.7.2.3. Modelos de semejanza simples

Tras los anteriores, se formularon los “modelos de semejanza simples” que responden a planteamientos más específicos del fenómeno de la dispersión densa. Entre ellos se encuentran los denominados “modelos de caja” (Box models), que inicialmente fueron desarrollados para emisiones instantáneas, figura 2.18 (A), y los de pluma densa o abatida para emisiones continuas, figura 2.18 (B). Destacan los trabajos de *Van Ulden (1979, 1984, 1987, 1988)*, *Van Ulden y de Haan, (1983)*, *Webber (1984)*, *Hanna y Drivas (1987)* y *Ermak, Rodean, Lange y Chan (1988)* y *Cox y Roe (1977)*.

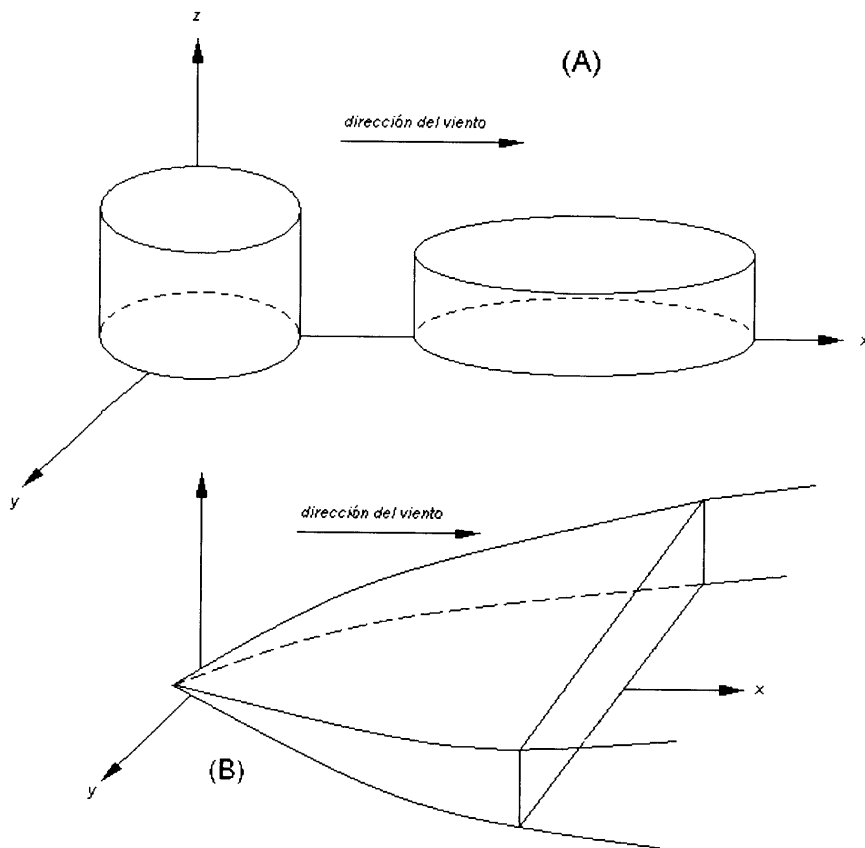


Figura 2.18. Esquemas básicos de los modelos de caja. A: para nubes instantáneas, B: para nubes continuas.

Si bien estos modelos pretenden describir el comportamiento de la nube, lo hacen desde un punto de vista globalizado, esto es, sin tener en cuenta las variaciones en el interior de la misma. Las hipótesis principales son las siguientes –*Van der Bosch y Weterings (1997a)* y *Lees (2001a)*–:

- La dispersión se produce sobre terreno llano o agua con rugosidad y temperatura uniformes.
- La mezcla con aire dentro de la nube es lo suficientemente rápida como para que la concentración y velocidad en ella sean uniformes en las tres dimensiones si la emisión es instantánea, y en la dirección transversal y vertical al viento si es continua. No se consideran las fluctuaciones de concentraciones locales.
- La morfología de la emisión instantánea se modeliza como un cilindro cada vez más achatado.
- Utiliza relaciones específicas para describir el crecimiento del radio y de la altura de la nube instantánea o la anchura transversal al viento y altura de la nube cuando es continua. También propone expresiones para los caudales de entrada de aire por la parte alta y por los bordes de la nube, como función de la velocidad de transferencia de calor con el suelo, de la diferencia de densidad con la atmósfera y del nivel de turbulencia.
- La concentración se obtiene por balances de materia.

Algunos de los programas informáticos de simulación que implementan modelos de caja son los siguientes: CHARM –de *Radian Corporation (1988)*–; DENZ –desarrollado por *Fryer y Kaiser (1979)*–; SAFER y TRACE –desarrollados a partir del trabajo de *Kaiser y Walker en (1978)*; CONSEQ, SAFETY y PFAST –en base a las propuestas de del trabajo de *Cox y Carpenter (1979)*–.

Estos modelos suponen una mejora respecto a los modelos adimensionales, pero aún se derivan de planteamientos excesivamente simples, limitando las estimaciones de la concentración del contaminante.

Las investigaciones más recientes en el campo de la dispersión de nubes densas tratan el proceso dispersivo en las tres direcciones del espacio, por lo que son conocidos como “*modelos tridimensionales*”, o también “*modelos de teoría K*” o “*modelos avanzados*”. Se basan en la aplicación de las ecuaciones de Navier Stokes para la conservación de la masa del contaminante emitido, de la masa total del sistema, de la energía y de la cantidad de movimiento en las tres direcciones del espacio, acompañadas de una ecuación de estado. Las mencionadas ecuaciones, que consideran al sistema como incompresible, se promedian respecto al tiempo expresándose en función de la velocidad del viento, temperatura, densidad y concentración del contaminante. Algunos de los modelos hacen uso de relaciones empíricas para determinar la difusividad turbulenta en función de la distancia a la fuga y de la clase de estabilidad atmosférica.

La resolución de los sistemas de ecuaciones anteriores plantea muchas dificultades, por lo que se utilizan técnicas numéricas, aunque el desarrollo de las metodologías no está suficientemente avanzado para ser implementados en programas de ordenador rutinarios. Así, por ahora, estos modelos tridimensionales deben considerarse como herramientas de investigación para el estudio de nubes densas.

Uno de los primeros **modelos avanzados o de teoría K** es el denominado SIGMET –*Havens, (1982a)* y *England et al (1978)*– desarrollado por el Science Applications Inc. (SAI) para la US Coast Guard. Surgió como consecuencia de la investigación del proceso dispersivo de grandes fugas de GNL sobre agua. Los sistemas de ecuaciones antes citados se aplican a nubes densas de gran anchura y poca altura, introduciendo las simplificaciones de eliminar el perfil de velocidad vertical y no considerar los efectos de la turbulencia.

2.7.2.4. Modelos de semejanza avanzados

La dificultad de adaptar los complejos modelos tridimensionales a los lenguajes de programación y, por otro lado, la excesiva simplicidad de los modelos de caja, propiciaron el desarrollo de los denominados “*modelos de semejanza avanzados*” (en ocasiones conocidos como *modelos de la teoría de la capa superficial*), cuyos planteamientos pueden considerarse intermedios de los anteriores. Así, incorporan hipótesis más realistas sobre la variación de las propiedades en el interior de la nube considerándolas uniformes sólo en los planos transversales al viento, lo que permite utilizar sistemas de conservación más sencillos, pudiendo así ser implementados en programas informáticos.

Dentro de este grupo se encuentran los modelos de *Zeman (1982)* implementado en el programa SLAB y el modelo HEGADAS desarrollado por Shell a partir de los trabajos de *te Riele (1977)* y *Colenbrander (1980)* entre otros. Ambos modelos se describen a continuación.

– El modelo SLAB:

Este modelo toma como base de partida los planteamientos llevados a cabo por *Zeman (1982)* para fugas de gases a baja temperatura más pesados que el aire. Posteriormente el grupo liderado por *Ermak y Chan (1982 y 1988)* lo implementaron en un programa informático denominado SLAB.

Originalmente el modelo se desarrolló para resolver fugas continuas considerando un comportamiento unidimensional, esto es, promediando las propiedades en las direcciones horizontal y vertical.

El modelo SLAB está basado en un conjunto de ecuaciones diferenciales simultáneas de conservación de la masa total, de la especie de interés, de la energía y de momento, a las que se añaden otras ecuaciones suplementarias, esto es, la ecuación de estado (sin considerar variaciones de presión), la ecuación que establece el caudal de entrada de aire en la nube y la que define los perfiles de concentración en las tres direcciones del espacio. Respecto a la entrada de aire, los algoritmos de SLAB distinguen entre la entrada vertical en la superficie y la entrada transversal y longitudinal al viento por los bordes de la nube –*Ermak (1990)*–.

Las modificaciones introducidas por *Ermak y Chan* en el programa informático permiten tratar también nubes instantáneas, de duración finita procedente de fugas superficiales a nivel de suelo (por ejemplo, la evaporación desde charcos) y flujos tipo jet. El programa también puede describir el comportamiento de nubes ligeras o neutras.

Las fugas instantáneas son consideradas como entradas de gas denso a la atmósfera durante un pequeño intervalo de tiempo. Por lo tanto, existe cierta limitación en caso de

fugas muy rápidas, como, por ejemplo, a partir de una rotura catastrófica de un tanque. Sólo puede tratar emisiones de sustancias químicas puras.

El programa informático de simulación Effects4 de TNO utiliza el modelo SLAB en el módulo de dispersión de gases densos procedentes de la evaporación desde charcos o de fugas tipo jet.

- El modelo HEGADAS.

Dentro de los modelos de semejanza avanzados, el HEGADAS (HEavy GAs Dispersion from Area Sources) es sin duda el más importante, aplicable a nubes continuas. En estado estacionario se denomina HEGADAS-S y en estado transitorio (cuasi-estacionario) se denomina HEGADAS-T.

Su desarrollo es consecuencia de la contribución de varios autores entre los que destaca *te Riele (1977)*, *Colenbrander (1980)* y posteriormente *Witlox (1991)*.

Para obtener el perfil de concentraciones en el interior de la nube, se aplican las ecuaciones de conservación de la masa y momento y se realizan hipótesis sobre otros aspectos relacionados con los mecanismos de entrada de aire en la nube, distribución de la velocidad en el interior de la misma, etc. Una representación básica de los perfiles de concentraciones de la nube se muestra en la figura 2.19, donde se observa que a partir de las etapas iniciales, donde las concentraciones en la dirección transversal al viento son constantes, pero variables en la dirección vertical, se configuran perfiles variables en las zonas más alejadas del eje longitudinal, permaneciendo constante la concentración en la zona central. Mientras que esto ocurra, la nube se considera densa, pero cuando el perfil adquiere una distribución completamente gaussiana, la nube se hace neutra (dispersión pasiva).

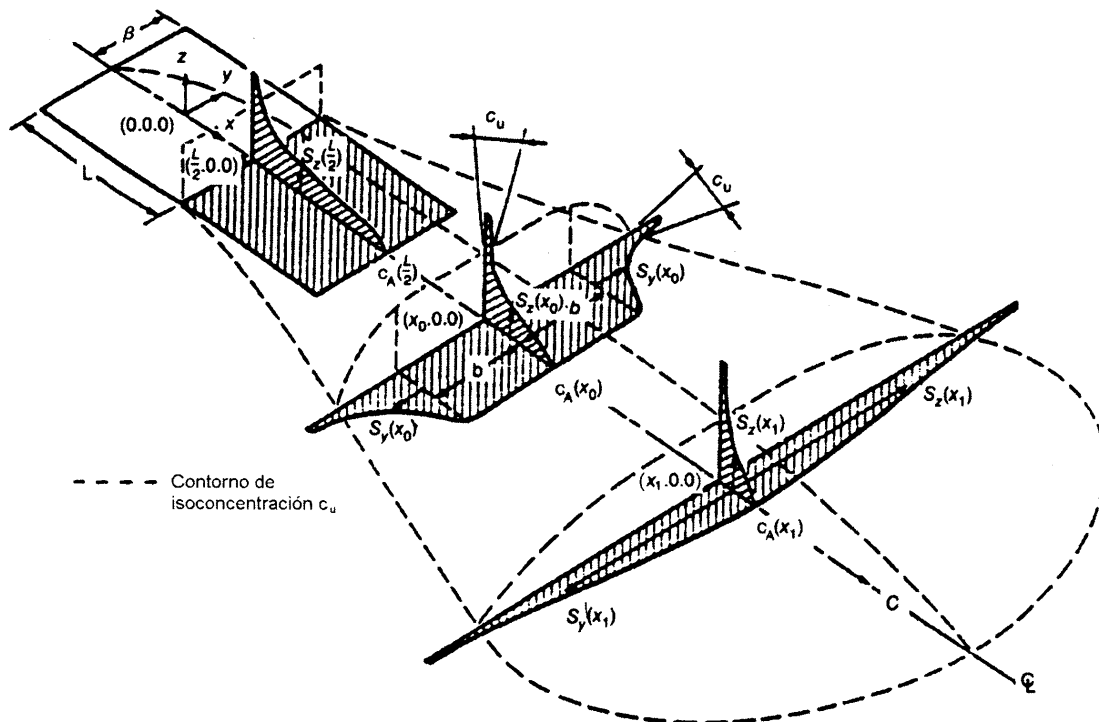


Figura 2.19. Esquema básico del modelo HEGADAS para la dispersión de gas denso –Puttock (1987b)–.

La versión HEGADAS-5, desarrollada por *Witlox (1991)*, incorpora una serie de mejoras entre las que destaca la conexión con otros modelos de fuga, siendo el más importante el denominado PLUME, para fugas verticales.

La interfase del HEGADAS-5 con los modelos de fuga se produce cuando la velocidad de la emisión se aproxima a la velocidad del viento.

Dispone de un criterio para evitar la transición a nube densa cuando la masa emitida se convierte en neutra debido a una entrada suficiente de aire.

Puttock y cols. (1991a, b) incluyeron en HEGADAS-5 un modelo termodinámico para el fluoruro de hidrógeno, sustancia que se hace más pesada que el aire debido a fenómenos de absorción de agua y polimerización.

HEGABOX es un submodelo incluido en HEGADAS para resolver fugas instantáneas o para fugas continuas en situaciones de baja velocidad de aire. Las fugas instantáneas se tratan como cilindros de concentraciones uniformes (de ahí la denominación de caja), planteando las ecuaciones que determinan el aumento del radio de la nube por la progresiva extensión de la misma sobre el suelo, así como los caudales de entrada de aire.

El modelo HEGADAS ha sido comprobado en varios experimentos llevados a cabo en la década de 1980 –*Colenbrander (1980)*, *Woodward y cols (1982)* y *Puttock (1987 a, 1987b)*–.

Está implementado dentro de un programa de ordenador más amplio denominado HGSYSTEM desarrollado por el Centro de Tecnología e Investigación de Shell. Este programa contiene un submódulo para fugas de fluoruro de hidrógeno (HFSYSTEM) y un modelo alternativo para dispersión pasiva (PGPLUME).

- El modelo DEGADIS.

Desarrollado por *Havens (1986)*, *Spicer y Havens (1986)* y *Spicer y Havens y cols. (1986)*, es una adaptación del HEGADAS pero también incorpora algunas hipótesis de *Van Ulden (1983)*.

Para fugas instantáneas parte de un modelo cilíndrico similar a los de caja y explica su extensión sobre el suelo mediante las entradas de aire por el frente de avance más que por la zona superior de la nube extendida.

La formación de este tipo de nubes se apoya en el modelo de Van Ulden que determina los caudales de aire de entrada y la evolución del volumen de la nube. Utiliza balances de calor y materia para determinar la evolución de las concentraciones del componente de interés a lo largo de la línea central de la nube (coincidente con la dirección del viento) así como en el plano vertical.

Por otro lado, plantea modelos aplicables a fugas transitorias y estacionarias. Para ello resuelve las ecuaciones de dispersión correspondientes, de forma análoga a como lo hace HEGADAS. Así, también en este caso las concentraciones en los extremos de la nube y en la dirección transversal siguen un comportamiento gaussiano.

Para cualquier tipo de fuga (instantánea, transitoria o continua) DEGADIS parte de la fuente situada sobre el suelo, por lo que en principio no podría modelizar fugas con altos momentos de emisión (tipo jet). Este planteamiento es el que adopta el programa informático ALOHA, que ha sido utilizado en este Guía para resolver los ejemplos planteados (Capítulo

8). No obstante, EPA conecta un modelo de jet desarrollado por *Ooms, Mahieu y Zelis (1974)* comentado a continuación.

- El modelo de Ooms.

El modelo está esquematizado en la figura 2.20 y está basado en las siguientes consideraciones –*Havens (1988)*–:

1. Los perfiles de densidad y concentración en planos transversales al jet son de tipo gaussiano.
2. Establece ecuaciones de balance de masa (total y del componente de interés), de energía y de momento.
3. Incorpora tres coeficientes empíricos para estimar los caudales de entrada de aire en el jet. El primero para la zona próxima a la salida donde la turbulencia del jet es máxima. El segundo aplicable a la zona en la que la velocidad del jet es próxima a la velocidad del viento. Y el tercero, que se adiciona a los anteriores, está relacionado con la turbulencia atmosférica, de manera que cuanto mayor sea ésta, mayor caudal de aire se incorporará al jet.

La resolución de las ecuaciones anteriores permite determinar la distancia alcanzada por el jet, la altura máxima en caso de que la salida sea vertical, la distancia a la que el eje central del jet contacta con el suelo, si es que lo hace, y, en su caso, la concentración en dicho punto.

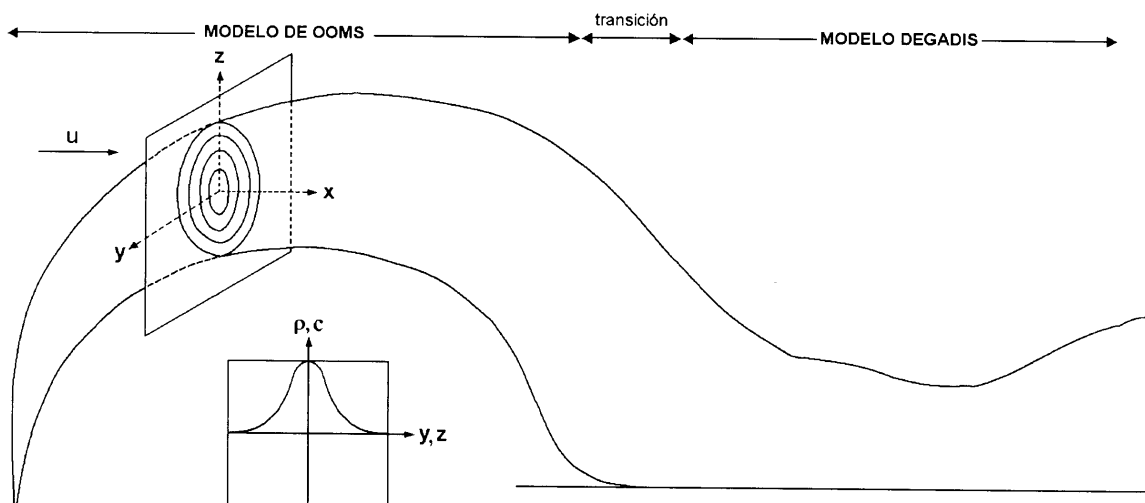


Figura 2.20. Esquema básico del modelo de Ooms y su conexión con el modelo DEGADIS.

Se deduce de lo anterior que la conexión de los modelos de Ooms y DEGADIS puede presentar serias dificultades. Así, si la entrada de aire en el jet es suficiente para que la nube final se comporte como neutra, no llegará a contactar con el suelo, y por consiguiente, la dispersión será la que corresponde a la situación pasiva. Es por ello importante evaluar si se

dará o no la situación anterior para evitar de esta manera partir en el modelo DEGADIS de un escenario erróneo.

2.7.3. El modelado de la dispersión densa en terrenos complejos y en presencia de obstáculos

La dispersión sobre terreno llano con rugosidad homogénea o en la que los elementos individuales de rugosidad son más pequeños que la altura de la nube, están bien estudiados y su influencia puede incluirse en los modelos de dispersión. Se sabe que para obstáculos mayores, se forma una zona de recirculación que puede extenderse hasta una altura 5 veces mayor que la del elemento que lo provoca –*Duijm y Webber, (1994)*–. Sin embargo, el flujo y la dispersión alrededor de obstáculos individuales, o de un conjunto de ellos, es difícil de describir y cuantificar.

En general la influencia sobre el proceso de la dispersión de gases densos de los terrenos complejos –como colinas, valles o edificios altos– o de las regiones costeras, no ha sido suficientemente investigada, y por tanto no son tenidos en cuenta en los modelos comentados.

Las investigaciones actuales se dirigen al desarrollo de modelos de dispersión densa sobre conjuntos de obstáculos limitados como pueden ser vallas perpendiculares a la dirección del viento, bloques uniformemente distribuidos o calles estrechas con edificios altos (calles cañón) –*Duijm y Webber, (1994)*–.

2.8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Britter, R.E.; McQuaid, J.; (1988). *Workbook on the Dispersions of Dense Gases*. Health and Safety Executive. Londres.
- Butterworth, D.; Hewitt, G.F.; (1977). *Two-Phase Flow and Heat Transfer*. Oxford Univ. Press. Oxford. [Citado por *Lees (2001)*].
- Center for Chemical Process Safety de AIChE; (1996). *Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models*. American Institute of Chemical Engineers. Nueva York.
- Chisholm, D.; (1983). *Two-phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers*. Godwin. London.
- Clancey, V.J. (1976a) Liquid and vapour emission and dispersion. *Course on Loss Prevention in the Process Industries*. Dept of Chem. Engng, Loughborough Univ. of Technol.
- Colenbrander G.W.; (1980). *A mathematical model for the transient behaviour of dense vapour clouds*. Loss Prevention and Safety Promotion **3**,1104.
- Cox, R.A.; Carpenter, R.J.; (1979). *Further developments of a dense vapour cloud dispersion model for hazard analysis*. Proceedings of the symposium on heavy gas dispersion, Frankfurt.
- Cox, R.A.; Roe, D.R.; (1977). *A model of the dispersion of dense vapour clouds*. Loss Prevention and Safety Promotion **2**, 359.
- Davenport, A.G.; (1963). *The relationship of wind structure to wind loading, presented at Int. Conf. on The Wind Effects on Buildings and Structures*, June 26-28, 1963. Natl. Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, Inglaterra. [citado por *Turner (1970)*]
- Duijm, N.J.; Webber, D.M.; (1994). *Dispersion in the presence of buildings*. J. Loss Prev. Process Ind., **7**,118.

- England, W.G. y cols.; (1978). *Atmospheric Dispersion of Liquefied Natural Gas Vapor Clouds using SIGMET, a Three-dimensional Time-dependent Hydrodynamic Computer Model*. Heat Transfer and Fluid Mechanics Inst., Washington State Univ., Pullman, WA.
- Ermak, D.L.; (1990). *User's manual for SLAB: an atmospheric dispersion model for denser-than-air releases*, Lawrence Livermore National Laboratory, California.
- Ermak, D.L.; Chan, S.T.; (1988). *Recent developments on the FEM3 and SLAB atmospheric dispersion models*. 261.
- Ermak, D.L.; Chan, S.T.; Morgan, D.J.; Morris, L.K.; (1982). *A comparison of dense gas dispersion model simulations with Burro series LNG spill test results*. J. Haz. Materials, **6** (1/2), 129.
- Ermak, D.L.; Rodean, H.C.; Lange, R.; Chan, S.T.; (1988), *A survey of denser-than air atmospheric dispersion models*, LLNL Report under contract W-7405-ENG-48.
- Finlayson, B.J.; Pitts, J.N.; (1986). *Atmospheric Chemistry*. John Wiley. Nueva York.
- Fletcher, B.; (1982). *Sudden discharge of superheated fluid to atmosphere*. The Assessment of Major Hazards. 25.
- Fryer, L.S.; Kaiser G.D.; (1979), *DENZ, a computer program for the calculation of the dispersion of dense toxic or explosive gases in the atmosphere*, Report UKAEA SRD R/52.
- Germeles, A.E.; Drake, E. M.; (1975). *Gravity spreading and atmospheric dispersion of LNG vapour clouds*. Transport of Hazardous Cargoes, 4.
- Gifford, F.A.; (1961). *Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion*. Nucl. Safety, **2**(4), 47.
- Golder, D.; (1972). *Relations among stability parameters in the surface layer*. Boundary-Layer Met. **3**, 47-58.
- Hanafusa, Lee y Lo ; (1986). Citado por Lees (2001). Vol.1, 15/83.
- Hanna, S.R.; (1987). *Review of vapor cloud dispersion models*. Vapor Cloud Modeling. **379**.
- Hanna, S.R.; Drivas, P.J.; (1987). *Guidelines for the use of vapor cloud dispersion models*. CCPS American Institute of Chemical Engineers. Nueva York.
- Hardee, H.C.; Lee, D.O.; (1975). *Expansion of clouds from pressurised liquids*. Accid. Anal. Prev., **7**, 91.
- Hart, P.W.; Sommerfeld, J.T.; (1993). *Fluid discharge resulting from puncture of spherical process vessels*. J. Haz. Materials, **33**, 295.
- Havens J.A.; (1986). *Mathematical modelling of heavy gas dispersion-an overview*. Loss prevention and Safety Promotion **5**, 32.2.
- Havens J.A.; (1988). *A dispersion model for elevated dense gas jet chemical releases*. Vol. I., US Environmental Protection Agency.
- Havens, J.A.; (1982a). *A description and computational assessment of the SIGMET LNG vapor dispersion model*. J. Haz Materials, **6** (1/2),181
- Hess, K.; Hoffmann, W.; Stoeckel, A.; (1974). *Propagation processes after the bursting of tanks filled with liquid propane-experiments and mathematical model*. Loss Prevention and Safety Promotion, **1**, 227.
- Hewitt, C.N.; (1999). *Reactive Hydrocarbons in the Atmosphere*. Academic Press, California.
- Holtslag, A.A.M.; van Ulden, A.P.; (1983). *A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data*. J. Climate Appl. Met., **22**, 517.

- Holtslag, A.A.M.; (1987). *Surface Fluxes and boundary layer scaling- model and applications*. KNMI WR-no 87-2, De Bilt.
- Kaiser, G.D.; Walker, B.C.; (1978). *Releases of anhydrous ammonia from pressurized containers-the importance of denser-than-air mixtures*. Atmos. Environment, **12**, 2289
- Klug, W.; (1969). *A method for the determination of dispersion conditions from synoptic observations*. Staub, **29**(4), 143. [Citado por Lees (2001)].
- Lee, K.S.; Sommerfeld, J.T.; (1994). *Maximum leakage time through puncture holes for process vessels of various shapes*. J. Haz. Materials, **38**, 27.
- Lees, F.F.; (2001). *Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 1. Butterworth-Heinemann. Oxford.
- Maurer, B. y cols.; (1977). *Modelling of vapour cloud dispersion and deflagration after bursting of tanks filled with liquefied gas*. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, **2**, 305. [Citado por Lees (2001)].
- Melhem, G.A.; Groce, P.A.; (1993). *Advanced Consequence Modelling Emission, Dispersion, Fires and Explosions, second draft July*. A.D. Little. [Citado por van den Bosch y Weterings (1997)]
- Morrow, T.B.; Bass, R. L.; Lock, J.A.; (1982). *An LPG pipeline break flow model*. Am Soc. Mech. Engrs, Fifth Ann. Energy Sources Technology Conf. ASME paper I00149. Nueva York.
- Obukhov, A.M.; (1971). *Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature*. Boundary –Layer Met., **2**, 7.
- Ooms, G. (1972). *A new method for the calculation of the plume path of gases emitted by a stack*. Atmos. Environ., **6**, 899.
- Ooms, G.; Mahieu, A. P.; Zelis F. (1974); *The Plume Path of Vent Gases Heavier than Air*. First International Symposium on Loss Prevention and Safety promotion in the Process Industries, (Buschman, C. H., Editor) Elsevier Press.
- Pasquill, F.; (1961). *The estimation of the dispersion of windborne materials*. Met. Mag., **90** (1063), 33. [Citado por Lees (2001)]
- Pasquill, F.; Smith, F.B.; (1971). *The meteorological basis for the estimation of the dispersion of windborne material*. Proc Second Int. Clean Air Congress. Academy Press., 1067.
- Pasquill, F.; Smith, F.B.; (1983). *Atmospheric Diffusion*. Wiley. Nueva York.
- Pasquill, F.; (1962). *Atmospheric diffusion*. Van Nostrand. Londres [Citado por Lees (2001)].
- Perry, R.H.; Chilton, C. H.; (1973). *Chemical Engineers´ Handbook*. 5ª Edición. McGraw-Hill. Nueva York.
- Prandtl, L.; (1933). *New results in turbulence research*. Z. Ver. Deutsch. Ing., **77**, 105. [Citado por Lees (2001)]
- Puttock J.S.; McFarlane, K.; Prothero, A.; Roberts, P.T.; Rees F.J.; Witlox, H.W.M.; Blewitt, D.N.; (1991a). *Dispersion models and hydrogen fluoride predictions*. J. Loss. Prev Process Ind., **4**(1), 16.
- Puttock J.S.; McFarlane, K.; Prothero, A.; Roberts, P.T.; Rees F.J.; Witlox, H.W.M.; Blewitt, D.N.; (1991b). *The HGSYSTEM dispersion modelling package development and predictions*. Modeling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases, 223.
- Puttock, J.S.; (1987a). *Comparison of Thorney Island data with predictions of HEGABOX/ HEGADAS*. J. Haz. Materials, **16**, 439.

- Puttock, J.S.; (1987b). *The development and use of HEGABOX/HEGADAS dispersion models for hazard analysis*. Vapor Cloud Modeling, 317.
- Radian Corporation; (1988). *Description of the Radian complex hazardous air release model*.
- Richardson, L.F. (1920). *The supply of energy from and to atmospheric eddies*. Proc. R. Soc., Ser. A, **97**, 354. [Citado por Lees (2001)]
- Richardson, L.F. (1925). *Turbulence and vertical temperature difference near trees*. Phil. Mag., **49**, 81. [Citado por Lees (2001)]
- Roberts, O.F.T.; (1923). *The theoretical scattering of smoke in a turbulent atmosphere*. Proc. R. Soc., Ser. A, **104**, 640.
- Santamaria, R.J.M.; Braña, A.P.A. ; (1994). *Análisis y Reducción de Riesgos en la Industria Química*. Fundación MAPFRE. Madrid.
- Schlichtling, H. (1936). *Ingen-Arch.*, **7**, 1. [Citado por Lees (2001)].
- Slade, D. H.; (1968). *Meteorology an Atomic Energy 1968 (report)*. Office of Inf. Services, Atom. Energy Comm., Washington.
- Sommerfeld, J.T.; Stallybrass, M. P.; (1993). *Elliptic integral solutions for fluid discharge rates from punctured horizontal cylindrical vessels*. J. Loss Prev. Process Ind., **6**, 11.
- Spicer, T.O.; Havens, J.A.; (1986). *Development of a heavier-than-air dispersion model for the US Coast Guard Hazard Assessment Computer System*. In Hartwing, S. (1986), op cit., 73.
- Spicer, T.O.; Havens, J.A.; Tebean, P.A.; Key, L.E.; (1986). *DEGADIS-a heavier-than air gas atmospheric dispersion model developed for the US Coast Guard*. Am. Poll. Control Ass., Proc, Ann. Conf., **paper 86-42.2**.
- Sutton, O.G.; (1953). *Micrometeorology*. McGraw-Hill. Nueva York. [Citado por Lees (2001)].
- te Riele P.H.M.; (1977). *The atmospheric dispersion of heavy gases emitted at or near ground level*. Loss Prevention and Safety Promotion **2**, 347.
- Turner, D.B.; (1961). *Relationships between 24-hour mean air quality measurements and meteorological factors in Nashville*. J. Air Poll. Control Ass., **11**, 483.
- Turner, D.B.; (1964). *A diffusion model for an urban area*. J. Appl. Met., **3**, 83.
- Turner, F.B.; (1970). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. Office of Air Programs, Environ. Prot. Agency, Research Triangle Park.; NC.
- Turner, D. B.; (1994). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. Lewis Pu., Boca Ratón. Carolina del Norte.
- van den Bosch, C. J. H.; Weterings, R.A.P.M.; (1997) *Methods for the Calculations of Physical Effects*. Committee for the prevention of Disasters, TNO.(Yellow Book) Vol. 1, The Hague.
- van Ulden, A.P.; de Haan, B.J.; (1983). *Two-dimensional unsteady gravity currents*. En de Wispelaere, C. (1983), op. Cit., 603.
- van Ulden, A.P.; (1974). *On the spreading of a heavy gas released near the ground*. Loss Prevention and Safety Promotion, **1**, 221.
- van Ulden, A.P.; (1979). *The unsteady gravity spread of a dense cloud in a calm atmosphere*. Proc. Tenth Int. Tech. Mtg on Air Pollution Modelling and Its Application (**NATO/CCMS**), 645.
- van Ulden, A.P.; (1984). *A new bulk model for dense gas dispersion: two-dimensional spread in still air*. In Ooms, G. y Tennekes, H (1984), op. cit., 419.

- van Ulden, A.P.; (1987). *The heavy gas mixing process in still air at Thorney Island and the laboratory*. J. Haz. Materials, **16**, 411
- van Ulden, A.P.; (1988). *The spreading and mixing of a dense cloud in still air*. E, Puttock, J.S. (1988b), op.cit., 141.
- Wallis, G.B.; (1969). *One Dimensional Two-Phase Flow*. McGraw-Hill. Nueva York. [Citado por Lees (2001)].
- Webber D.M.; (1984). *Gravity spreading in dense gas dispersion models*. En Ooms, G. Y Tennekes, H. (1984), op cit., 397.
- Weiss, M.N.; Botros, K. K.; Jungowski, W.M.; (1998). *Simple method predicts gas-line blow-down times*. Oil & Gas Journal. **Dic**, 12.
- Witlox, H. W. M.; (1991). *Recent development of heavy-gas dispersion modelling*. Modeling a Mitigating the consequences of Accidental Releases, 183.
- Woodward, J. L.; Havens, J.A.; McBride, W.C.; Taft, J.R.; (1982). *A comparison with experimental data of several models for dispersion of heavy vapor clouds*. J. Haz. Materials, **6** (1/2),161.
- Zeman, O.; (1982). *The dynamics and modeling of heavier-than-air cold gas releases*. Atmos. Environ., **16**, 741.

La toxicidad de las sustancias químicas en aire

De forma genérica el término “tóxico” hace referencia a una sustancia química o biológica o fenómeno físico que al penetrar o interactuar con un organismo es capaz de producir algún efecto nocivo orgánico, genético, molecular, funcional, celular o bioquímico, sobre él o sobre los equilibrios dinámicos que sustentan su vida y como consecuencia de ello se menoscaba su salud, pudiéndole incluso provocar la muerte –*Repetto (1997)*–.

Para el ámbito de aplicación aquí considerado, esta definición es demasiado amplia, interesando que el término tóxico quede restringido únicamente a las sustancias químicas.

Aunque las vías de entrada de los tóxicos al organismo son diversas: oral, dérmica, parenteral y pulmonar, sólo se tendrá en cuenta ésta última, dado que es la de mayor significación en el ámbito de esta Guía.

3.1. CLASIFICACIÓN DE LOS TÓXICOS

Las sustancias con capacidad tóxica pueden clasificarse en función de diversos criterios, tales como –*Klaassen (1995)*–:

3.1.1. Según la naturaleza química del tóxico

- a. Minerales o compuestos inorgánicos: metales, metaloides, minerales, álcalis, ácidos y sus sales, etc.
- b. Compuestos orgánicos: hidrocarburos, alcoholes, aldehídos y cetonas, ácidos orgánicos, ésteres, fenoles, aminas, amidas, compuestos nitro o compuestos azufrados, glucósidos, alcaloides, proteínas, etc.

3.1.2. Según el mecanismo y el efecto que produce su acción tóxica

- a. Los que actúan a nivel respiratorio (Neumotóxicos).
- b. Los que actúan a nivel del sistema nervioso central (Neurotóxicos).
- c. Los que provocan alteraciones digestivas y hepáticas (Gastroenterotóxicos).
- d. Los que provocan alteraciones renales (Nefrotóxicos).
- e. Los que afectan a la piel y las mucosas (Dermatotóxicos).
- f. Los que afectan al sistema cardiocirculatorio (Cardiotóxicos).

- g. Los que producen tumores (Carcinógenos).
- h. Los que afectan a la sangre y órganos productores de la sangre (Hematotóxicos).
- i. Los que producen malformaciones en el embrión que no se transmiten a las generaciones sucesivas (Teratogénicos)
- j. Los que alteran el ADN, de modo que la mutación es transmisible a las generaciones sucesivas (Mutagénicos).
- k. Los que afectan al aparato reproductor.
- l. Los que afectan al sistema inmune.
- m. Los que provocan alteraciones del aparato locomotor.

3.1.3. Según su toxicidad:

Por inhalación, (concentración letal 50 en ratas durante 4 horas):

- a. Extremadamente tóxico: < 10 ppm.
- b. Altamente tóxico: 10-100 ppm.
- c. Moderadamente tóxico: 100-1 000 ppm.
- d. Ligeramente tóxico: 1000-10 000 ppm.
- e. Prácticamente no tóxico: 10 000-100 000 ppm.
- f. Relativamente inocuo: >100 000 ppm.

Por vía oral, (dosis letal 50 única en ratas):

- a. Extremadamente tóxico: < 1 mg/kg.
- b. Altamente tóxico: 1-50 mg/kg.
- c. Moderadamente tóxico: 50-500 mg/kg.
- d. Ligeramente tóxico: 0,5-5 g/kg.
- e. Prácticamente no tóxico: 5-15 g/kg.
- f. Relativamente inocuo: >15 g/kg.

Vía cutánea: (dosis letal 50 única en conejos):

- a. Extremadamente tóxico: < 5 mg/kg.
- b. Altamente tóxico: 5-50 mg/kg.
- c. Moderadamente tóxico: 50-350 mg/kg.
- d. Ligeramente tóxico: 0.35-3 g/kg.
- e. Prácticamente no tóxico: 3-25 g/kg.
- f. Relativamente inocuo: >25 g/kg.

Los efectos no dependen sólo de la cantidad y de la vía de entrada sino también de otros factores, como la velocidad de absorción, la constitución física, edad, sexo, peso y estado de salud –*Lauwerys (1994)*–. La evolución de la intoxicación puede ser muy diferente en función del tóxico y de la cantidad que penetra en el organismo, distinguiéndose *entre*:

- **Intoxicación aguda:** cuando la aparición del cuadro patológico es rápida tras la absorción o puesta en contacto de la sustancia con el organismo. La evolución puede llevar a la muerte o a la recuperación total o parcial del individuo.
- **Intoxicación subaguda:** situación intermedia entre la intoxicación aguda y la crónica. De forma general, se trata de procesos que revisten menor gravedad que las intoxicaciones agudas, con cursos muchas veces subclínicos, sin que se presenten de forma clara y directa.
- **Intoxicación crónica:** produce el deterioro progresivo del estado de salud con lenta evolución, pudiendo llegar a ser irreversible.

3.2. TOXICIDAD POR VÍA RESPIRATORIA

3.2.1. Sustancias irritantes y asfixiantes

Dado que el ámbito aquí considerado trata de la interacción de las sustancias tóxicas dispersas en aire y el hombre, la vía de entrada más importante es la respiratoria, siendo la mucosa que la recubre un medio con elevada capacidad de absorción para gases o partículas (líquidas o sólidas) hidrosolubles, al estar dicha mucosa formada y recubierta de un fluido con alto contenido en agua.

Las sustancias tóxicas de mayor interés se clasifican en dos grupos dependiendo que tengan o no acción irritante, teniendo éstas últimas características asfixiantes en su mayor parte.

- Las sustancias con acción irritante son aquellas que presentan elevada reactividad con los tejidos biológicos, siendo las representantes más importantes los ácidos, bases, aldehídos de cadena corta y oxidantes. Se caracterizan por producir extensas y profundas lesiones en la mucosa respiratoria.

La localización del daño dependerá de la concentración en el aire, de la duración de la exposición y del grado de hidrosolubilidad. Con respecto a este último parámetro, cabe indicar que cuanto mayor es el grado de solubilidad en agua, más cerca y antes se produce la absorción del compuesto y, por consiguiente, el daño se localiza principalmente en el tracto respiratorio superior. Por el contrario, aquellas sustancias poco hidrosolubles, se absorben más lentamente penetrando en zonas más profundas, esto es, en bronquios, bronquiólos y alvéolos. La tabla 3.1 clasifica los irritantes de acuerdo con esta característica y la tabla 3.2 muestra las manifestaciones clínicas más relevantes derivadas de la acción irritante sobre el aparato respiratorio.

Algunos irritantes, como el sulfuro de hidrógeno, producen también otros efectos tóxicos al inhibir enzimas que participan en la oxigenación tisular (a nivel de los tejidos) o invalidar la hemoglobina para el transporte de oxígeno, clasificándose también como asfixiantes.

TABLA 3.1. Localización de los efectos en función de la solubilidad de la sustancia en agua

Localización del daño pulmonar	Hidrosolubilidad	Ejemplos de sustancias
Tracto respiratorio superior	Alta	Amoníaco, sulfuros
Tracto respiratorio medio	Moderada	Cloro
Tracto respiratorio inferior	Baja	Fosgeno, vapores nitrosos

TABLA 3.2. Efectos y manifestaciones clínicas de las sustancias irritantes

Efecto	Manifestaciones clínicas
Reducción del aclaramiento bacteriano y del transporte mucociliar	Neumonía
Corrosión y edema de la mucosa	Atelectasias*. Edema de glotis
Aumento de la permeabilidad alveolocapilar (para gases con moderada/leve acción irritante)	Edema agudo pulmonar no cardiogénico (EAPNC)

* Atelectasias: estado de colapso y falta de aire en una zona o todo el pulmón.

- Los asfixiantes más importantes son los cianuros y derivados (ácido cianhídrico, cianógeno, cloruro de cianógeno, bromuro de cianógeno, acetonitrilo y acrilonitrilo) y el monóxido de carbono.

Los cianuros son asfixiantes que actúan provocando un bloqueo enzimático que imposibilita la utilización periférica de oxígeno, paraliza la generación de ATP (Adenosín Trifosfato) y acelera la producción excesiva de ácido láctico.

Respecto al monóxido de carbono, su carácter asfixiante es múltiple, ya que además de impedir la oxigenación a nivel de los tejidos, es 200-250 veces más afín a la hemoglobina que el oxígeno, de modo que la invalida para su transporte. También compite con el oxígeno por los centros activos que contienen hierro o cobre de las hemoproteínas, disminuyendo el transporte de oxígeno al músculo cardíaco y a los músculos de las extremidades.

3.2.2. Parámetros que determinan la toxicidad: concentración y dosis

Considerando exclusivamente los efectos inmediatos que las sustancias químicas pueden provocar sobre los seres humanos, esto es, sin valorar los efectos genotóxicos a medio o largo plazo (teratogénesis, mutagénesis o carcinogénesis) y con relación a las magnitudes que determinan el daño, se distinguen dos tipos de sustancias: aquellas cuyos efectos están relacionados con la **dosis** y las que su toxicidad depende de la **concentración**. Las primeras se denominan también “*dependientes del tiempo*” mientras que las segundas se considera que tienen “*valores techo*”.

El concepto de dosis da idea de forma intuitiva de que para cada sustancia hay una cierta cantidad que no produce efecto alguno, pero al aumentar ésta produce respuestas biológicas con efectos adversos crecientes. La relación entre el tipo de respuesta y la dosis suministrada fue preconizada por primera vez por Paracelsus, quien en 1493 expresó que

“Todos los remedios son venenos y la diferencia entre remedio y veneno está en la dosis recibida”.

La dosis por vía respiratoria en los animales superiores **está definida por la combinación factorial de la concentración de la sustancia en aire (c) y el tiempo de exposición (t_{exp}) a dicha concentración**, expresándose mediante la ecuación general siguiente –ten Berge (1986)–:

$$D = c^n t_{exp} \quad (3.1)$$

El exponente n puede tener valores igual a la unidad –ley de Haber– o comprendido entre 0.8 y 4 –ley de la potencia o de ten Berge– predominando los valores superiores a la unidad. Si se conoce el valor de n para una sustancia dada se pueden determinar las combinaciones concentración-tiempo que producirían un mismo efecto.

Las sustancias cuyos efectos dependen de la concentración son aquellas que presentan una elevada reactividad química sobre los tejidos biológicos en tiempos muy cortos, provocando irritación, corrosividad o cualquier otro tipo de daño que se manifieste muy rápidamente. A estas sustancias se les asignan “valores techo”, esto es, concentraciones que no deben ser superadas en ningún momento.

Desde un punto de vista más amplio, cualquier sustancia “dependiente del tiempo” también llega a ser “dependiente de la concentración”. Mediante un caso práctico puede explicarse de forma más conveniente este comportamiento: según Gephart y Moses (1989), la dosis de cloro en aire para un nivel de daño determinado sigue la ley de Haber:

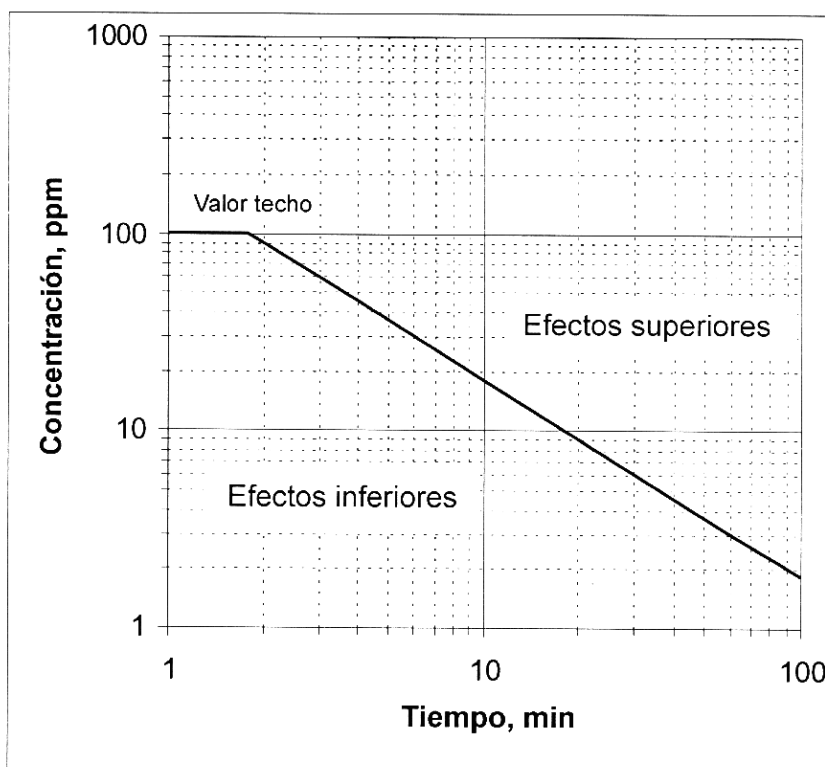


Figura 3.1. Combinación concentración-tiempo para un nivel de daño determinado para el cloro.

$$D = c \cdot t_{exp} = 180 \text{ ppm} \cdot \text{min} \quad (3.2)$$

lo que permite determinar combinaciones concentración-tiempo que provocarían el mismo nivel de daño, tales como 3 ppm y 60 minutos; 6 ppm y 30 minutos; 36 ppm y 5 minutos, etc; esto es así hasta que la concentración alcanza 100 ppm (cuyo tiempo asociado es de 1.8 minutos según la ecuación 3.2), de manera que cualquier otra combinación equivalente a la dosis anterior, donde la concentración fuese mayor a dicho valor, provocaría un nivel de daño superior; en otros términos, 100 ppm es un valor techo para el cloro que no debe ser superado en ningún momento para tiempos de exposición inferiores a 1.8 minutos. En la figura 3.1 se representa el comportamiento citado.

En definitiva, las magnitudes que definen el daño provocado por las emisiones accidentales de productos tóxicos en aire son la concentración o la dosis, dependiendo una u otra del nivel y rapidez con que se manifiesten los efectos que provoquen.

3.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gephart, L.; Moses, S. (1989). *An Approach to Evaluate the Acute Imports from Simulated Accidental Releases of Chlorine and Ammonia*, Plant/Operation Progress, Vol. 8, 1, 8-11.
- Klaassen, C.D.; (1995). *Casarett and Doull's Toxicology*. McGraw Hill. Nueva York.
- Lauwetys, R.; (1994). *Toxicología industrial e intoxicaciones profesionales*. Masson. Barcelona.
- Repetto, M.; (1997). *Toxicología Fundamental*. Díaz de Santos. Madrid.
- ten Berge, W.F.; Zwart, A.; Appelman, L.M.; (1986). *Concentration-time mortality response relationship of irritant and systemically acting vapours and gases*. Journal of Hazardous Materials. Vol. 13, 3, 301-309.

Valores límite de sustancias tóxicas en aire aplicados a situaciones de emergencia

En la década de los años 1930, instituciones de varios países iniciaron el desarrollo de límites de exposición a sustancias tóxicas por inhalación, originariamente dirigidas a ámbitos laborales, tratando de evitar con ello la génesis de efectos agudos o de enfermedades crónicas profesionales. Después, las evaluaciones se extendieron a situaciones de emergencia derivadas de accidentes que originen la emisión al aire de sustancias peligrosas. Pero han sido muchas las dificultades encontradas; por un lado, el establecimiento de límites de exposición es una tarea compleja, que requiere la intervención de especialistas y la disponibilidad de medios adecuados, generalmente de elevados costes y, por otro, no se ha logrado la aceptación generalizada de criterios uniformes para establecer los límites de exposición por parte de las organizaciones dedicadas a estos temas, lo que ha dado lugar a disparidades de los índices para las mismas sustancias y mismos niveles de daño. Otro aspecto a destacar se refiere al diseño operativo utilizado para determinar dichos valores límite que, en la mayoría de los casos, parte de la experimentación con animales de laboratorio, lo que introduce elevados niveles de incertidumbre al trasladar los resultados a los seres humanos. Finalmente, se constata la necesidad de ampliar el número de sustancias que dispongan de índices adecuados para establecer con garantías las actuaciones de protección en caso de accidentes.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ÍNDICES MÁS UTILIZADOS

En la actualidad, los límites de exposición a sustancias químicas de mayor reconocimiento a nivel internacional son los que se describen a continuación:

4.1.1. AEGs: Acute Exposure Guideline Levels –AEG (1999)–.

Proceden de los índices CEELs (Community Emergency Exposure Levels), propuestos por la Environmental Protection Agency (EPA) de EEUU. Actualmente se han adoptado por organismos de otros países al ser reconocida su credibilidad científica.

El desarrollo de los AEGs se lleva a cabo mediante los niveles siguientes:

- 1. Inicial o de partida (Draft).** Es el valor que establece un grupo de expertos en base a la literatura científica publicada sobre la toxicología de la sustancia en cuestión, teniendo en cuenta también los datos relevantes no publicados aportados por el sector privado.

2. **Propuesto** (Proposed). Un comité especial (denominado NAC/AEGL) considera la fiabilidad del valor inicial en base a los estudios en los que se apoya, pasando a este nivel. Es entonces publicado en el Registro Federal para que, durante un periodo de 30 días, sea consultado y se realicen los comentarios y objeciones que se considere oportunas.
3. **Provisional** (Interim). Las opiniones vertidas tras la revisión pública son revisadas y discutidas por el comité para decidir la conservación del valor *propuesto* en la etapa anterior o su modificación en función de las justificaciones científicas aportadas.
4. **Final** (Final). El valor provisional, así como el razonamiento científico en el que se apoya, son posteriormente presentados a un subcomité para su revisión y aprobación, tras el cual, se publica por el National Research Council, adquiriendo así la categoría de valor definitivo.

Las principales características de los índices AEGLs son las siguientes:

- **Tipo de población aplicable:** general, incluyendo los individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles.
- **Tiempo de exposición:** se determinan para 30 minutos, 1 hora, 4 horas y 8 horas. En algunos casos se dispone también del valor correspondiente a 10 ó 5 minutos de exposición. Esta multiplicidad de valores posibilita una interpolación fiable entre los intervalos de tiempo antes citados y permite, además, conocer si el daño provocado por la sustancia considerada es función sólo de la concentración (valor techo) o si, por el contrario, depende del tiempo de exposición, esto es, de la dosis.
- **Factores de seguridad:**
 - Un factor de incertidumbre inter-especie para extrapolar los resultados obtenidos en la experimentación animal a la especie humana .
 - Un factor de incertidumbre intra-especie para tener en cuenta el mayor efecto del tóxico sobre los individuos humanos más sensibles.
 - Y un factor modificador que se utiliza en aquellos casos en los que la experimentación no ofrece suficiente seguridad debido a diversas causas, como, por ejemplo, disparidad con otros resultados, insuficiente número de experimentos, o cualquier otra eventualidad. Este factor modificador es de uso muy reducido.
- **Niveles de efectos:**

AEGL-1.- *Concentración a o por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles, puede experimentar molestias notables, irritación o ciertos efectos asintomáticos. Estos efectos son transitorios y reversibles una vez que cesa la exposición. Concentraciones por debajo del AEGL-1 representan niveles de exposición que producen ligero olor, sabor u otra irritación sensorial leve.*

AEGL-2.- *Concentración a o por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles, puede experimentar efectos duraderos serios o irreversibles o ver impedida su capacidad para escapar. Concentraciones por debajo del AEGL-2 pero por encima del AEGL-1 representan niveles de exposición que pueden causar notable malestar.*

AEGL-3.- Concentración a o por encima de la cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles pero excluyendo los hipersusceptibles, puede experimentar efectos amenazantes para la vida o incluso provocar la muerte. Concentraciones por debajo del AEGL-3 pero por encima del AEGL-2 representan niveles de exposición que pueden causar efectos duraderos, serios o irreversibles o impedir la capacidad de escapar.

- **Número de sustancias con índices disponibles** en diferentes estados de desarrollo: 96. Se pretende elaborar valores límite para 400 ó 500 sustancias tóxicas prioritarias en un período de 10 años.

La Agencia Federal de Medio Ambiente de Alemania ha publicado la relación de las sustancias que actualmente disponen de valores AEGL en los estados de desarrollo “propuestos”, “provisionales” y “finales”. Ésta relación –*AEGL (2003)*– se ha incluido en el CD adjunto a esta Guía (Anexo I). Dado que los índices están en continuo desarrollo, se recomienda su revisión frecuente para mantener al día la base de datos.

- **Fecha de revisión:** julio de 2003.

Observaciones: A pesar del reducido número de sustancias que disponen de AEGL, el hecho de que esté definido para diferentes períodos de exposición lo hace muy útil para la planificación ante emergencias químicas. Los diseños experimentales para obtenerlos están normalizados y consensuados por los organismos internacionales que intervienen en su desarrollo. Se pretende utilizarlos para planificar las respuestas frente a emergencias en los ámbitos general, laboral y militar, así como para situaciones accidentales derivadas del transporte de mercancías peligrosas. Es previsible que en un futuro cercano sea el comúnmente utilizado, reemplazando al resto de los índices.

4.1.2. ERPGs: Emergency Response Planning Guidelines –*AIHA (1998)*–

Han sido desarrollados por la American Industrial Hygiene Association (AIHA). Sus principales características son las siguientes:

- **Tipo de población aplicable:** general; puede ocurrir que individuos muy sensibles sufran reacciones adversas por debajo de los límites establecidos.
- **Tiempo de exposición:** una hora.
- **Factores de seguridad:** no tiene.
- **Niveles de efectos:**

ERPG-1.- Es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta una hora experimentando sólo efectos adversos ligeros y transitorios o percibiendo un olor claramente definido.

ERPG-2.- Es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta una hora sin experimentar o desarrollar efectos serios o irreversibles o síntomas que pudieran impedir la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.

ERPG-3.- Es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta una hora sin experimentar o desarrollar efectos que amenacen su vida.

- **Número de sustancias:** 101.
En el Anexo 2 se incluyen los valores disponibles del índice ERPG –*ERPG (2002)*–.
- **Fecha de revisión:** 2 de julio de 2002.

4.1.3. TEELs: Temporary Emergency Exposure Limits –*Craig y Ray Lux (1998)*–

Han sido desarrollados por el Subcommittee on Consequence Assessment and Protective Actions (SCAPA) del Departamento de Energía de los EEUU. Sus principales características son las siguientes:

- **Tipo de población aplicable:** general.
- **Tiempo de exposición:** 15 minutos.
- **Factores de seguridad:** la metodología comparativa múltiple utilizada introduce implícitamente factores de seguridad.

TABLA 4.1. Índices y parámetros toxicológicos utilizados para el desarrollo de los TEELs

Clase de TEEL	Primer índice	Otros índices
		EEGL (30 min) IDLH LC ₅₀
TEEL-3	ERPG-3	LC _{L0} LD ₅₀ LD _{L0}
TEEL-2	ERPG-2	EEGL (60 min) LOC PEL-C TLV-C REL-C WEEL-C TLV-TWA x 5 TC _{L0} TD _{L0}
TEEL-1	ERPG-1	PEL-STEL TLV-STEL REL-STEL WEEL-STEL Otros STEL TLV-TWA x 3
TEEL-0	PEL-TWA	TLV-TWA REL-TWA WEEL-TWA MAK-TWA Otros-TWA CEGL

- **Niveles de efectos:**

TEEL-0.- *Es la concentración umbral por debajo de la cual la mayor parte de las personas no experimentarían efectos apreciables sobre la salud.*

TEEL-1.- *Es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos experimentarían efectos ligeros y transitorios sobre la salud o percibirían un olor claramente definido.*

TEEL-2.- *Es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos podrían estar expuestos sin experimentar o desarrollar efectos sobre la salud serios o irreversibles o síntomas que pudieran impedir la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.*

TEEL-3.- *Es la máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos podrían estar expuestos sin experimentar o desarrollar efectos amenazantes para la vida.*

- **Número de sustancias:** 2234.

En el Anexo 2 se incluyen los valores disponibles del índice TEEL –TEEL (2002)–.

- **Fecha de revisión:** 6 de diciembre de 2002.

Observaciones: Son aplicables a cortos periodos de exposición (15 minutos). No tienen base experimental, habiendo sido deducidos a partir de otros índices y parámetros toxicológicos, aplicados de forma jerárquica siguiendo una metodología común para todas las sustancias. Como índices de referencia se utilizan los ERPGs para los TEELs 1, 2 y 3 y el PEL-TWA para el TEEL-0; si no se disponen de dichos índices se utilizan otros, siguiendo la jerarquía indicada en la tabla 4.1

4.1.4. IDLH: Immediately Dangerous to Life or Health¹

Traducido al castellano como *Inmediatamente Peligroso para la Vida o la Salud* (IPVS). Es un índice desarrollado por el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), que es la Agencia Federal de los EEUU responsable de la investigación y desarrollo de aspectos relacionados con la prevención de riesgos laborales. Las principales características son las siguientes:

- **Tipo de población aplicable:** laboral, por lo que no debe aplicarse a poblaciones generales. El objetivo de los IDLH es “*establecer la concentración para la cual un trabajador puede escapar sin sufrir daño o efectos irreversibles para la salud en caso de fallo del equipo de protección respiratoria (por ejemplo, agotamiento del filtro o avería del sistema de suministro de aire). A partir de dicha concentración se requiere el uso de equipos de protección respiratoria de altas prestaciones. En las situaciones en las que no se sobrepasen los IDLHs se considera que no debe imposibilitar la huida del trabajador (por ejemplo, no debe provocar desorientación, descoordinación o desfallecimiento)*”.

¹ Información obtenida de la página oficial del Center for Disease Control & Prevention de EEUU (CDC): <http://www.cdc.gov>

- **Tiempo de exposición:** 30 minutos. No se han encontrado referencias sobre criterios de extrapolación a otros periodos de tiempo.
- **Factores de seguridad:** se utilizan factores conservadores cuando la información para el establecimiento de un IDLH determinado procede del ámbito de la experimentación animal.
- **Número de sustancias con índices disponibles:** 390.
La página oficial del *Center for Disease Control and Prevention* (CDC) de EEUU ofrece documentación sobre los IDLHs así como el listado de valores disponibles y actualizados.
- **Fecha de revisión:** 3 de enero de 1995.
Observaciones: como se ha indicado anteriormente, este índice está desarrollado como criterio de selección y utilización de equipos de protección respiratoria en ámbitos laborales y no específicamente para emergencias derivadas de accidentes químicos. De hecho, la AIHA (American Industrial Hygiene Association) ha criticado seriamente los valores IDLH, considerando que no deben ser utilizados como índices de emergencia donde pueda estar implicada la población general.

4.1.5. EEGLs: Emergency Exposure Guidance Levels –NAS (1986)–

Han sido desarrollados por el Committee on Toxicology del National Research Council (COT-NRC), por encargo del Department of Defense (DOD) de EEUU. Son aplicables a personal militar, por lo que no son aconsejables para evaluar consecuencias sobre poblaciones generales. Se considera que los efectos sobre la salud provocados por la exposición a estos niveles son reversibles y no impedirían la huida durante la emergencia.

Se dispone de índices para 41 sustancias. La mayoría de ellos están definidos para periodos de 1 y 24 horas y en algunos casos para otros periodos, generalmente 10 y 30 minutos. Han sido publicados entre los años 1984 y 1987.

4.1.6. SPEGLs: Short-term Public Exposure Guidance Levels –NAS (1986)–

Han sido desarrollados por el COT-NRC para su utilización en zonas residenciales próximas a instalaciones militares, por lo que pueden considerarse aplicables a poblaciones generales. Sólo se dispone de índices para cinco sustancias (hidracina, dimetilhidracina, monometilhidracina, dióxido de nitrógeno y cloruro de hidrógeno). Están definidos para periodos comprendidos entre 1 y 24 h, resultando muy conservadores comparados con otros índices.

4.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEGL; (1999). *Standing Operating Procedures of the National Advisory Committee on Acute Exposure Guideline Levels for Hazardous Substances (Draft)*. NAC/AEGL FACA Committee.

AEGL; (2003). *Acute Exposure Guideline Levels*. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt, R&D: 298 48 332). <<http://umweltbundesamt.de/anlagen/AEGLWEB/>>. [Consulta: 5 de septiembre de 2003].

- AIHA; (1998). *Emergency Response Planning Guidelines and Workplace Environmental Exposure Level Guides Handbook*, American Industrial Hygiene Association, (EEUU).
- Craig, D.K.; Ray Lux, C.; (1998). *Methodology for Deriving Temporary Emergency Exposure Limits (TEELs)*. Westinghouse Safety Management Solutions. Westinghouse Savannah River Company, Project Engineering & Construction Division, Aiken (EEUU).
- ERPG; (2002). *SCAPA ERPG Working List*. American Industrial Hygiene Association. <<http://www.bnl.gov/scapa/scapwl.htm>>. [Consulta: 12 de julio de 2003].
- NAS (1986). *Criteria and Methods for Preparing Emergency Exposure Guidance Level (EEGL), Short-Term Public Emergency Guidance Level (SPEGL), and Continuous Exposure Guidance Level (CEGL)*. Commission on Life Sciences, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC (EEUU).
- TEEL; (2002). *Revision 19 of ERPGs and TEELs for Chemicals of Concern*. U.S. Department of Energy's Chemical Safety Program. <http://tis.eh.doe.gov/web/chem_safety/teel.htm>. [Consulta: 1 de septiembre de 2003].

Índices propuestos. Características y limitaciones

Una vez descritos los índices disponibles para evaluar situaciones de emergencia provocadas por nubes tóxicas, conviene relacionar los criterios que se han utilizado en esta Guía para seleccionar los índices considerados más idóneos:

1. Que los Organismos o Instituciones que los han desarrollado gocen de reconocido prestigio en este ámbito.
2. Que sean aplicables a poblaciones generales, antes que a sectores poblacionales específicos.
3. Que estén definidos para varios periodos de exposición, posibilitando así una interpolación fiable dentro de cualquier intervalo.
4. Que contemplen el mayor número posible de las sustancias presentes en la industria (iniciales, intermedias, finales o generadas accidentalmente).
5. Que los efectos provocados por la exposición a los índices estén claramente definidos. Este aspecto es básico para delimitar con ciertas garantías las zonas de planificación.

El **IPVS** se utilizó en la anterior *Directriz Básica (1991)* debido a que era el único índice que gozaba de reconocimiento internacional, aunque presenta el inconveniente de haber sido desarrollado para poblaciones laborales; en este sentido, conviene indicar que ciertos sectores pueden ser especialmente vulnerables a los contaminantes químicos en aire (niños, ancianos y personas con afecciones o enfermedades respiratorias), por lo que, aunque no se sobrepase dicho índice, los niveles de daño en estos segmentos de población pueden ser superiores a los que serían previsibles según la definición del IPVS. Otro inconveniente de este índice es que contempla un solo nivel de daño, pero interesa disponer de mayores posibilidades para delimitar las dos zonas de planificación previstas en la *Directriz*. Finalmente cabe señalar que está definido para un único tiempo de exposición de 30 minutos, lo que plantea una gran rigidez a la hora de planificar escenarios donde los tiempos de paso de las nubes sean distintos al citado.

Por otro lado los **EEGLs** y **SPEGLs**, antes comentados, tienen importantes limitaciones que desaconsejan su utilización.

Por ello, considerando los criterios de selección anteriores, se establece en la Directriz Básica la siguiente selección y jerarquía:

1. **AEGLs**
2. **ERPGs**
3. **TEELs.**

El índice **AEGL** tiene las siguientes ventajas:

- Fue inicialmente propuesto por la EPA ha sido adoptado por otros países; en Europa se lleva a cabo un amplio proyecto para desarrollar un índice semejante (Proyecto Acutex), pretendiendo que se convierta en el más importante referente utilizado en situaciones de emergencia donde estén involucradas nubes tóxicas.
- Está desarrollado para su aplicación a poblaciones generales.
- Dispone de tres niveles de daño, definidos en el apartado 4.1.1, útiles para la determinación de las zonas de planificación.
- Cada nivel de daño está definido para 30 minutos, 1, 4 y 8 horas y en algunos casos también para 10 minutos, lo que permite su adaptación a la duración de la mayoría de los escenarios accidentales. Por otro lado, la multiplicidad de periodos disponibles en cada nivel de daño permite la interpolación a otros tiempos diferentes, tal y como se indicará posteriormente.
- El mayor inconveniente es el escaso número de sustancias que dispone de AEGLs (a mediados de 2003 solo se han publicado datos para 96 sustancias, en diferentes estadios de desarrollo), aunque se espera elaborar índices para 400 ó 500 sustancias a lo largo de esta década.

Cuando la sustancia no dispone de AEGL se recomienda utilizar el índice **ERPG**, que presenta las mismas ventajas que el anterior, aunque con la importante limitación de estar definido para un único periodo de exposición de una hora. El compromiso aceptado por diversos organismos nacionales e internacionales en cuanto a concentrar los esfuerzos de investigación en los AEGLs o índices similares puede limitar el desarrollo de nuevos ERPGs, por lo que no se espera que aumente de forma considerable el número actual de los mismos –para 101 sustancias–.

Los **TEELs**, recomendados en tercer lugar, constituyen la base de datos más extensa (2234 sustancias). Se trata de valores límite con las mismas características señaladas para los anteriores, exceptuando el tiempo de exposición, que en este caso es de 15 minutos, disponiendo de cuatro niveles de daño (0, 1, 2 y 3) en lugar de tres. No están desarrollados mediante bases experimentales; se han deducido por extrapolación de otros índices, *jerarquizados en la tabla 4.1, y según el Departamento de Energía de los EEUU “deben utilizarse únicamente si la sustancia de interés no dispone de índice ERPG”*. Cualquier sustancia que disponga de ERPG tiene también índice TEEL, adoptando ambos el mismo valor de concentración a pesar de estar definidos para tiempos de exposición diferentes.

Los índices anteriores presentan algunas características y limitaciones que conviene analizar por su influencia en los criterios adoptados para definir las zonas de planificación.

5.1. LOS NIVELES DE DAÑO DE LOS ÍNDICES AEGLs, ERPGs Y TEELs

En la tabla 5.1 se resumen las definiciones de los niveles de daño o efectos, indicados en el apartado 4.1, observándose que las correspondientes a los ERPGs y TEELs son idénticas. Por el contrario, a primera vista, estas últimas definiciones pueden parecer diferentes a las correspondientes de los AEGLs, pero analizadas con mayor detenimiento se deduce que cada nivel define los mismos efectos o daños sea cual fuere el índice. La aparente discrepancia se produce como consecuencia de considerar cada nivel como límite superior de efectos en los ERPGs y TEELs y como límite inferior en los AEGLs.

TABLA 5.1. Efectos previsibles para los diferentes niveles de los índices AEGLs, ERPGs y TEELs

Nivel del índice	AEGL	ERPG y TEEL
Superior a 3	Efectos amenazante para la vida, pudiendo incluso provocar la muerte.	
3 →		
Superior a 2	Efectos duraderos serios e irreversibles. La capacidad de huida puede verse impedida.	No se experimentan efectos que amenazan la vida
2 →		
1 →	Incomodidad o malestar notable.	No se desarrollan efectos serios o irreversibles y no se imposibilita la capacidad de huida.
Superior a 0 ó inferior a 1	Ligero olor, sabor o irritación sensorial leve.	Efectos adversos ligeros y transitorios. Olor claramente definido
0 →		
Inferior a 0		Sólo para TEEL's: Sin efectos apreciables sobre la salud

Analizando un nivel de un índice concreto se puede comprender mejor esta circunstancia; así, el nivel 2 de los ERPGs o TEELs se define como:

“la máxima concentración por debajo de la cual se cree (para 60 ó 15 minutos de exposición, respectivamente) que no se producen efectos serios o irreversibles o que impidan la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.”

Esta definición puede transformarse en la siguiente:

“La mínima concentración por encima de la cual se cree (para 60 ó 15 minutos de exposición respectivamente) que pueden producirse efectos serios o irreversibles o que impidan la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.”

Esta última definición coincide con la que corresponde al nivel 2 del AEGL. Este planteamiento es extensivo a todos los demás niveles de los índices seleccionados.

5.2. LA RELACIÓN CONCENTRACIÓN-TIEMPO DE EXPOSICIÓN

Como se indicó anteriormente, el número de periodos de referencia de los índices seleccionados son diferentes (uno para los ERPGs y TEELs y cuatro o cinco para los AEGLs). Esta heterogeneidad y la metodología utilizada para el desarrollo de los índices citados, condicionan la aplicabilidad de los mismos para la determinación de las zonas de planificación, verificándose lo siguiente:

- Todos los índices representan valores techo (máximos) que no se deben superar durante el periodo de referencia, es decir, ninguno de los índices tiene carácter de concentración media ponderada en su período de referencia.
- Sólo los AEGLs permiten deducir si los comportamientos tóxicos de las sustancias que disponen de estos índices son dependientes de la concentración o del tiempo de exposición (dosis).

La justificación al primer planteamiento se deduce al analizar la metodología utilizada para la determinación de la mayoría de los índices, que se fundamenta en la experimentación animal y posterior extrapolación a los humanos. El diseño de cada experimento consiste en la exposición de un grupo representativo de especímenes (generalmente ratones, ratas o cobayas) a una determinada concentración en aire de la sustancia investigada, que **permanece constante** durante el período de referencia del índice. Finalizada la experiencia se determina el nivel medio de daños provocados, comparando el resultado con un grupo de control no expuesto. Las experiencias se repiten con nuevos grupos y concentraciones hasta determinar la que produce, aproximadamente, el efecto o daño definido por el nivel del índice correspondiente¹.

En estas experiencias, para cada nivel e índice, la concentración de la sustancia investigada permanece constante durante todo el periodo evaluado y, por consiguiente, no debe utilizarse como referente para deducir los efectos provocados por perfiles variables de concentración-tiempo que en algunos momentos presenten valores superiores a los del índice, aunque la ponderación de la concentración en el período de referencia sea inferior a la de éste último. Así, las figuras 5.1 A, B y C muestran un determinado índice (representado por un rectángulo) y perfiles variables cuyas concentraciones máximas y/o tiempos de exposición son superiores a los del índice; en estos casos no es posible asegurar si los niveles de daño provocados por los perfiles variables son iguales, mayores o menores que el provocado por el índice considerado. Sólo es posible garantizar que los daños provocados por los perfiles variables son menores (o a lo sumo iguales) a los del índice cuando las concentraciones y tiempos de exposición son menores o iguales a los respectivos del índice, situación que está representada en la figura 5.1 D.

¹ Esta concentración se denomina de "efecto 50", esto es, la que produce el efecto definido por el nivel (1, 2 ó 3) del índice investigado, durante el periodo de referencia, sobre el 50% de los animales expuestos.

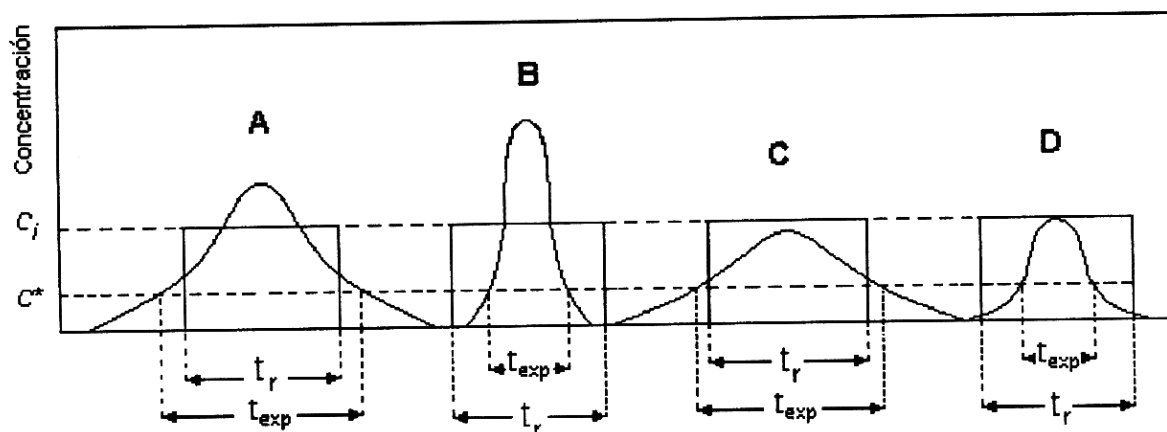


Figura 5.1. A, B, C y D: Perfiles variables de concentración-tiempo de exposición (t_{exp}) que se comparan con el perfil rectangular representativo de un determinado índice, definido por la concentración del índice (c_i) y el tiempo de referencia (t_r). (Los tiempos de exposición de los perfiles variables se definen para una concentración mínima de referencia $-c^*$, posteriormente comentada.)

Respecto al segundo planteamiento, cabe indicar que los índices ERPGs o TEELs no permiten determinar el comportamiento toxicológico de las sustancias para cada nivel de daño, en cuanto a si son dependientes de la concentración (valor techo) o del tiempo de exposición (dosis), definidos en el apartado 3.2.1, dado que sólo disponen de un único periodo de referencia. Por el contrario, es posible conocer el comportamiento citado para las sustancias con AEGLs al disponer de varios periodos de referencia para cada nivel de daño, aspectos que se justifican a continuación.

5.2.1. Interpolación y extrapolación de los índices

La determinación de las zonas de planificación se lleva a cabo mediante un procedimiento gráfico, posteriormente comentado, donde se parte de la representación del índice seleccionado en un diagrama concentración-tiempo, extendiendo el/los valor/es a tiempos diferentes a los de referencia mediante las interpolaciones y extrapolaciones adecuadas.

Con relación a los AEGLs, tal y como se ha indicado en apartados anteriores, los diferentes niveles de daño están definidos para cuatro o cinco periodos de referencia, cuya representación en el diagrama citado informa de las características toxicológicas de la sustancia en cuestión, con relación a su dependencia de la “concentración” o del “tiempo de exposición” y, por otro lado, permite la interpolación a tiempos diferentes a los de referencia.

Considerando un ejemplo concreto se pueden exponer con mayor claridad las consideraciones anteriores. En la tabla 5.2 se indican los AEGLs 1 y 2 para el fluoruro de hidrógeno que, a su vez, se representan en la figura 5.2, observándose:

TABLA 5.2. AEGL 1 y 2 para el fluoruro de hidrógeno, en mg/m³.

	Tiempo, min	10	30	60	240	480
AEGL	Nivel 1	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	Nivel 2	79.04	28.29	19.97	9.98	7.16

Para el AEGL1:

1. Presenta un valor “techo” de 0.83 mg/m³ en el intervalo comprendido entre 10 minutos y 8 horas.

Para el AEGL-2:

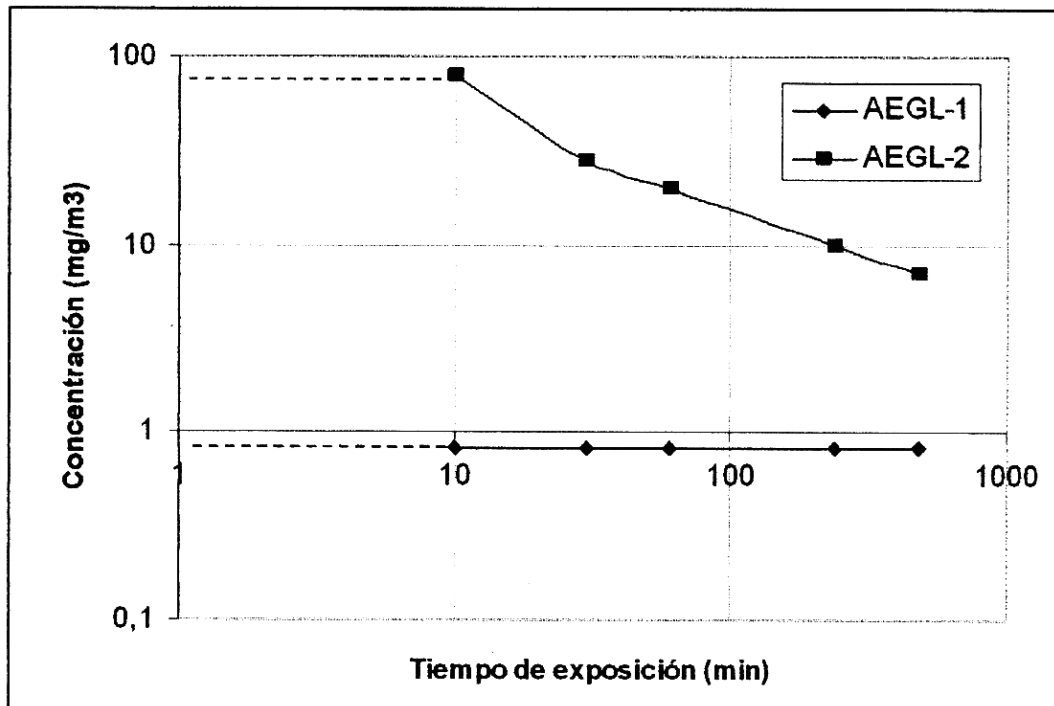


Figura 5.2. Representación de los valores concentración-tiempo correspondientes a los AEGLs 1 y 2 para el fluoruro de hidrógeno.

1. En todo el intervalo (de 10 minutos a 8 horas), el comportamiento tóxico del fluoruro de hidrógeno es “dependiente del tiempo”.
 - En el intervalo comprendido entre 10 y 30 minutos, la dosis se calcula mediante:

$$D_{10} = D_{30} = (79.04 \text{ mg/m}^3)^n 10 \text{ min} = (28.29 \text{ mg/m}^3)^n 30 \text{ min} \quad (5.1)$$

A partir de la ecuación 5.1 se deduce que el exponente n tiene el valor 1.07 y, por consiguiente, la dosis equivale a

$$D = 1073 (\text{mg/m}^3)^{1.07} \text{ min} = c_{\text{max}}^{1.07} t_{\text{exp}} \quad (5.2)$$

de donde

$$c_{max} = \left(\frac{D}{t_{exp}} \right)^{\frac{1}{1.07}} \quad (5.3)$$

- En el intervalo comprendido entre 30 minutos y 8 horas, la expresión es la siguiente:

$$D_{30} = D_{480} = (28.29 \text{ mg/m}^3)^n 30 \text{ min} = (7.16 \text{ mg/m}^3)^n 480 \text{ min} \quad (5.4)$$

Por tanto, la dosis equivale a:

$$D = 27153 (\text{mg/m}^3)^{2.02} \text{ min} = c_{max}^{2.02} t_{exp} \quad (5.5)$$

En general se verifica:

$$c_{max} = \left(\frac{D}{t_{exp}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.6)$$

que es la ecuación propuesta en la *Directriz Básica (2003)*, aunque en ésta se considera como tiempo de exposición (t_{exp}) el correspondiente al paso de la nube tóxica por el lugar evaluado, como posteriormente se comenta.

Por otro lado, para tiempos de exposición diferentes a los definidos en los índices AEGLs se recomienda efectuar las extrapolaciones siguientes:

1. *Para tiempos inferiores al menor periodo disponible (10 ó 30 minutos) considerar que el comportamiento tóxico es “dependiente de la concentración”.* Este criterio se ha seguido en el ejemplo anterior, tal y como se muestra en la figura 5.2, donde la concentración se mantiene constante para tiempos inferiores a 10 minutos.
2. *Para tiempos superiores al mayor periodo disponible (que para los AEGLs es siempre de 8 horas) aplicar la ley de Haber, esto es:*

$$c_{max,x} = AEGL-X_{8h} \frac{8}{t_{exp}} \quad \text{para } t_{exp} \geq 8 \text{ horas} \quad (5.7)$$

Donde t está expresado en horas y la x hace referencia al nivel de daño considerado (1, 2 ó 3).

Los dos criterios anteriores son conservadores, permitiendo garantizar que el daño provocado en los seres humanos por cualquier combinación concentración-tiempo que siga las mencionadas extrapolaciones nunca será superior al que define el nivel de daño considerado.

En el caso de los ERPGs y TEELs, las relaciones concentración-tiempo están limitadas a un único punto, representado en la figura 5.3.

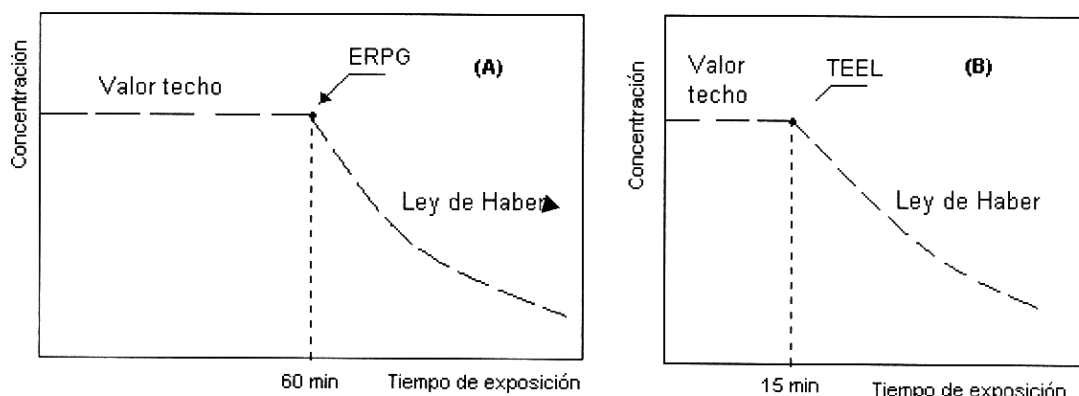


Figura 5.3. Extrapolaciones aplicables a los índices ERPGs (A) o TEELs (B).

Si no se dispone de información toxicológica adicional, la extrapolación de ambos índices se realiza con los mismos criterios que los utilizados para los AEGLs. Esto es:

1. Para tiempos menores a 60 minutos, para los ERPGs, o 15 minutos, para los TEELs se recomienda considerar que la concentración es un valor "techo".
2. Para tiempos superiores a 60 minutos (ERPGs) o 15 minutos (TEELs) se recomienda aplicar la ley de Haber, que conduce a las expresiones siguientes:

$$c_{max,x} = ERPG-X \frac{60}{t_{exp}} \quad \text{para } t_{exp} \geq 60 \text{ min} \quad (5.8)$$

$$c_{max,x} = TEEL-X \frac{15}{t_{exp}} \quad \text{para } t_{exp} \geq 15 \text{ min} \quad (5.9)$$

Donde t viene expresado en minutos y la x hace referencia al nivel de daño seleccionado.

Estos criterios son los utilizados en la *Directriz Básica (2003)*.

Las razones de esta propuesta son las mismas que las indicadas para los AEGLs por lo que se desestima su reiteración.

5.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Directriz Básica (1991). *RESOLUCIÓN de 30 de enero de 1991, de la Subsecretaría por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la directriz básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico*. (B.O.E. n.º 32 de (6-2-91).

Directriz Básica (2003): Real Decreto (196/2003), de 19 de septiembre, por el que se aprueba la *Directriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación ante el Riesgo de Accidentes Graves en los que intervienen Sustancias Peligrosas*. (B.O.E. n.º 242 de 9-10-03).

Determinación de las zonas de planificación para nubes tóxicas

La *Directriz Básica (2003)* define dos zonas de planificación: de **Intervención** y de **Alerta**. En la primera el nivel de daño ocasionado por el accidente justifica la aplicación inmediata de medidas de protección; en la segunda no es necesario llevar a cabo dichas medidas, excepto sobre los grupos críticos, constituidos por aquellos sectores de población que sean especialmente vulnerables a los niveles de los parámetros que determinan la peligrosidad del accidente.

Para establecer las zonas de planificación en el caso de nubes tóxicas, es necesario en primer lugar definir los niveles de daño en cada una de las zonas y a continuación determinar la extensión y geometría de las mismas. Dada la complejidad de cálculo de estos parámetros, se recomienda utilizar programas informáticos especialmente diseñados para esta finalidad.

6.1. NIVELES DE DAÑO EN LAS ZONAS DE PLANIFICACIÓN PARA NUBES TÓXICAS

Se trata ahora de seleccionar los niveles de daño de los índices que permitan delimitar justificadamente las dos zonas de planificación antes citadas.

En el apartado 5.1 se definen los daños previsibles que se producirían entre los diferentes niveles de los índices seleccionados, concluyéndose que niveles iguales de cualquiera de los índices definen los mismos daños. A partir de la tabla 5.1 se configura la tabla 6.1 donde se han unificado los daños o efectos que caracterizan a las zonas comprendidas entre los niveles de todos los índices, incluyendo también los daños o efectos que no se producen en cada caso, para, de esta manera, evitar ambigüedades o incertidumbres.

Tomando como referencias las definiciones de la tabla 6.1, **se propone el nivel de daño 2 como límite de la zona de intervención** dado que:

1. Si se adoptara el nivel de daño 3, se estaría aceptando en la zona de alerta la génesis de efectos serios e irreversibles y posibles impedimentos de la capacidad de huir, lo que estaría en contradicción con la tipología de los efectos aceptables en esta zona.
2. El nivel de daño 1 sería excesivamente conservador para el citado límite. De ser así, conduciría a zonas de intervención excesivamente amplias; que conllevarían a la previsión de actuaciones de protección desproporcionadas.

TABLA 6.1. Niveles unificados de daños y efectos para todos los índices seleccionados (AEGLs, ERPGs y TEELs)

Nivel del índice	Descripción de daños o efectos para los índices AEGLs, ERPGs y TEELs		ZONA DE PLANIFICACIÓN
3 →	Se produciría amenaza para la vida.		INTERVENCIÓN
	Se producirían: –Efectos a largo plazo serios e irreversibles. –Posible impedimento a la capacidad de huir.	No se produciría amenaza para la vida	
2 →	Se produciría incomodidad o malestar notable.	No se producirían: –Efectos a largo plazo serios o irreversibles. –Impedimento de la capacidad de huir.	ALERTA
1 →	Se produciría olor, irritación sensorial u otros efectos leves y transitorios.	No se produciría incomodidad o malestar notable.	

En definitiva, la propuesta citada implica que en la zona de alerta se produciría “incomodidad o malestar notable”, pero no sería necesario medidas especiales de protección o de asistencia sanitaria sobre la mayoría de la población.

Para delimitar inferiormente la zona de alerta se propone el nivel de daño 1. Por debajo de dicho nivel sólo se percibiría olor o ligera irritación transitoria.

6.2. DETERMINACIÓN DEL ALCANCE DE LAS ZONAS DE PLANIFICACIÓN PARA NUBES TÓXICAS

En el capítulo 5 se exponen los criterios y consideraciones que permiten establecer implícitamente la metodología para determinar las concentraciones o dosis que caracterizan las zonas de planificación, interesando aquí concretar y unificar la secuencia para determinar el alcance de las mencionadas zonas:

1. Obtener los perfiles concentración-tiempo de paso de las nubes a varias distancias del origen del accidente y en la dirección del viento. Para ello es necesario utilizar programas informáticos adecuados; en esta Guía se ha operado con el programa ALOHA, comentado en el capítulo 7. En la figura 6.1. se representan varios perfiles típicos de una nube “instantánea” (A) y de otra “continua o semicontinua” (B) proporcionados por el programa informático tras introducir los datos de la emisión y las características atmosféricas reinantes o supuestas, observándose la disminución de la concentración máxima y el aumento del tiempo de paso en cada enclave conforme crece la distancia al origen del accidente.

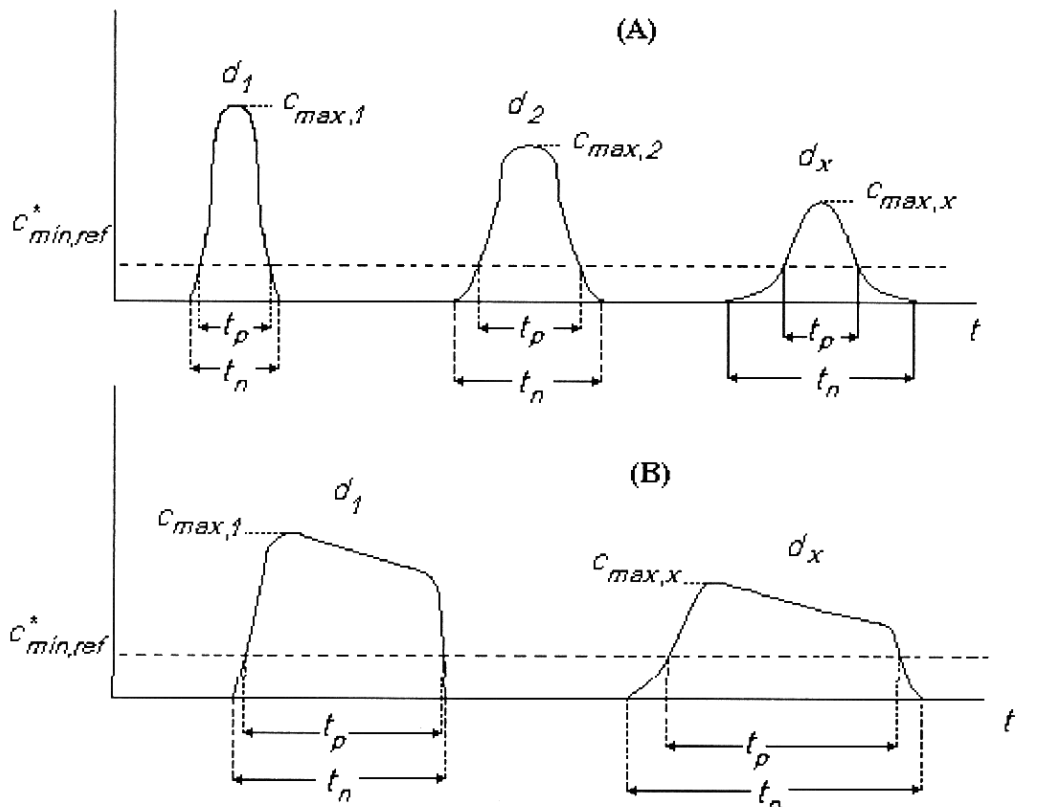


Figura 6.1. Perfiles típicos concentración-tiempo en enclaves situados a diversas distancias del origen del accidente ($d_1 < d_2 < \dots < d_x$) para nubes de corta duración (A) y de media o larga duración (B).

2. Los tiempos de paso totales (t_n) resultan excesivamente elevados para utilizarlos como periodos de exposición, dado que contienen intervalos en los que las concentraciones de entrada y salida de la nube en cada enclave son nulas. Debe tenerse en cuenta que los perfiles citados proceden de funciones exponenciales, cuyos extremos ($C=0$) se extienden cuasi asintóticamente, aumentando artificial y excesivamente los tiempos totales de paso. Por ello, conviene fijar periodos más realistas, que se han definidos como **tiempos de paso efectivos**, aunque para simplificar se denominarán en adelante **tiempos de paso** (t_p), que representan más adecuadamente la exposición. Estos periodos están representados en la figura 6.1, siendo los transcurridos desde la “entrada” y “salida” en cada enclave de una determinada concentración mínima de referencia ($c_{min,ref}^*$), que se establece de la forma siguiente:
 - 2.1. Si la sustancia analizada tiene AEGL seleccionar el valor correspondiente al AEGL-1 para 8 horas de exposición. Por la propia definición del nivel 1 de efectos de los AEGLs se considera que dicho límite es adecuado para la finalidad citada, teniendo en cuenta además que al periodo citado (8h) le corresponde el menor valor del citado índice.
 - 2.2. Si el índice utilizado es el ERPG (en ausencia de AEGL), seleccionar la octava parte del ERPG-1. Este valor es *análogo* al AEGL-1 para 8 horas, obtenido por aplicación de la ley de Haber al valor del ERPG-1 (ver apartado 5.2.1 y figura 5.3):

$$c_{min,ref}^* = (1/8) ERPG-1_{(1 \text{ hora})} \quad (6.1)$$

- 2.3. Si el índice utilizado es el TEEL (en ausencia de AEGL y ERPG) seleccionar el valor $(1/32)TEEL-1$. Esta propuesta sigue el mismo criterio que el caso anterior, esto es, se extrapola a 8 horas el valor TEEL-1 (que está definido para 15 minutos):

$$c_{min,ref}^* = (1/32) TEEL-1_{(15 \text{ min})} \quad (6.2)$$

Además de las concentraciones mínimas de referencia citadas, se pueden utilizar otras, como, por ejemplo, los valores límite adoptados en ámbitos laborales siendo los de mayor aceptación los siguientes:

TLV-TWA de la ACGIH (EEUU)
 PEL-TWA de la OSHA (EEUU)
 REL-TWA del NIOSH (EEUU)
 MAK-TWA (Alemania)
 VLA-ED (España)

3. Una vez determinados los tiempos de paso y las concentraciones máximas asociadas de los perfiles de las nubes, se representan en la misma figura que contiene los dos niveles (1 y 2) del índice disponible (AEGL, ERPG o TEEL) –ver figura 6.2–

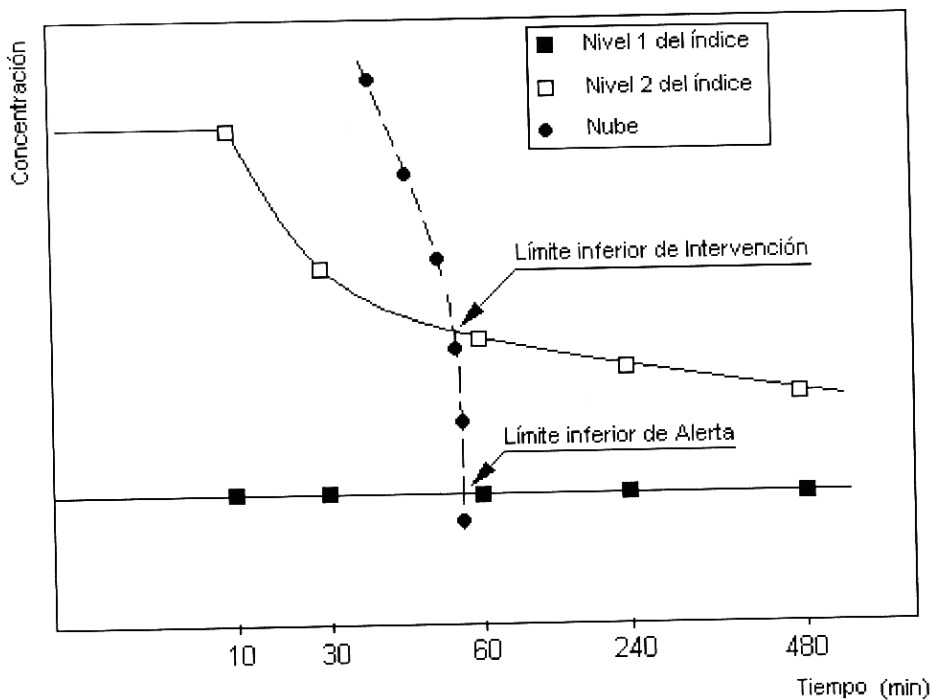


Figura 6.2. Representación genérica de los niveles 1 y 2 del índice disponible (en este caso el AEGL) y una línea típica obtenida por unión de algunas relaciones concentraciones máximas-tiempos de paso de una nube. Los puntos de corte son los límites inferiores concentración-tiempo de paso, que a partir de ellos permite determinar el alcance de las zonas de Intervención y Alerta del accidente evaluado.

obteniéndose dos puntos de corte que determinan los valores característicos (concentración y tiempo de exposición) que definen **las Zonas de Intervención y Alerta**.

La figura 6.2 recoge dos casos diferentes: el nivel de daño 1 está caracterizado por un valor techo, de manera que sea cual fuere el tiempo de paso, la concentración que corresponde a la zona de Alerta sería siempre la misma; por el contrario, el nivel 2 representa un comportamiento dependiente del tiempo, de forma que conforme aumenta el tiempo de paso de la nube disminuye la concentración máxima.

4. Las concentraciones representativas de las zonas de Intervención y Alerta se introducen en el programa informático, determinándose las distancias máximas a las que se alcanzan dichas concentraciones.
5. Los programas informáticos suelen proporcionar líneas de isoconcentración en el plano x-y a nivel de suelo ($z = 0$), o a otras alturas ($z > 0$), interesando el plano citado en primer lugar ($z = 0$) al representar las situaciones más conservadoras (concentraciones máximas) y al ser el nivel donde suelen encontrarse la mayoría de los elementos vulnerables. En la figura 6.3A y 6.3F se representan genéricamente las zonas de Intervención y Alerta para un mismo accidente pero con dos clases de estabilidad atmosférica, muy inestable (A) y muy estable (F).

A efectos de planificación, al no conocer a priori la dirección del viento y, por consiguiente, de la nube, las zonas de Intervención y Alerta se consideran circulares, de tal forma que los radios de las mismas se hacen coincidir con las máximas distancias de las correspondientes isolíneas de concentración, tal y como se indica en la figura 6.4.

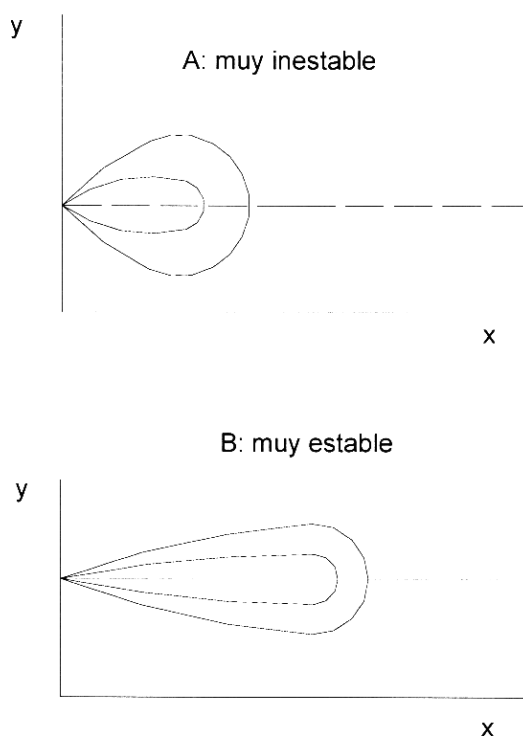


Figura 6.3. Líneas de isoconcentración para un mismo accidente pero con dos clases de estabilidad: muy inestable (A) y muy estable (F).

Los ejemplos que se incluyen en el Apartado 8 están desarrollados con la metodología aquí propuesta, pretendiendo con ello contribuir a la mejor comprensión del procedimiento.

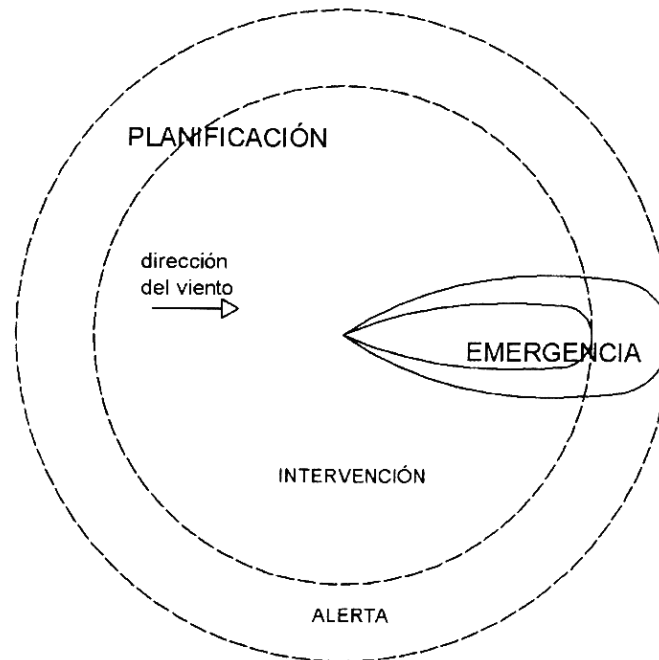


Figura 6.4. Representaciones genéricas de las zonas de Intervención y Alerta para nubes tóxicas. En emergencia se conoce la dirección del viento, lo que permite delimitar las zonas afectadas (elipsoides). En planificación no es conocida la dirección del viento, por lo que las zonas afectadas se consideran circulares, con centro en el origen del accidente.

6.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Directriz Básica (2003). Real Decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la *Directriz Básica de Protección Civil para el Control y Planificación ante el Riesgo de Accidentes Graves en los que intervienen Sustancias Peligrosas*. (B.O.E. nº 242, de 9-10-03).

El programa ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres)

Para exponer de forma práctica la metodología propuesta en el capítulo anterior se hace uso del programa informático ALOHA –EPA (1999)–. La utilización de este programa no invalida la selección de otros desarrollados para estos fines. La elección responde a la especial ventaja de estar disponible en Internet, lo que posibilita su utilización generalizada por parte de los especialistas o interesados en estos temas. Además de la ventaja citada, caben destacar las siguientes:

1. Ha sido desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency) y la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de EEUU, gozando de reconocido prestigio.
2. Está específicamente diseñado para su aplicación a escenarios accidentales, pudiendo simular emisiones desde tuberías y recipientes utilizados en la industria o derrames que forman charcos y la simultánea dispersión, tanto de nubes neutras como pesadas.
3. Dispone de una amplia base de datos de sustancias y permite la introducción de otras.
4. Entre otros resultados, permite la obtención de perfiles concentración-tiempo de las nubes en los puntos requeridos, lo que resulta especialmente útil para la metodología aquí propuesta.

Como principales inconvenientes del programa cabe citar:

1. El cálculo de la dispersión de las nubes está limitado a 60 minutos y a 10 km. del origen de la emisión, y sólo determina valores de concentración o dosis a nivel del suelo.
2. Las predicciones del modelo deben tomarse con reservas en los casos siguientes:
 - 2.1. Para pequeñas velocidades de viento.
 - 2.2. En condiciones atmosféricas muy estables.
 - 2.3. En enclaves muy cercanos al origen de la emisión.
3. El modelo no permite operar con partículas o mezclas de sustancias.
4. Está diseñado para terreno llano (aunque considera diferentes rugosidades u obstáculos).

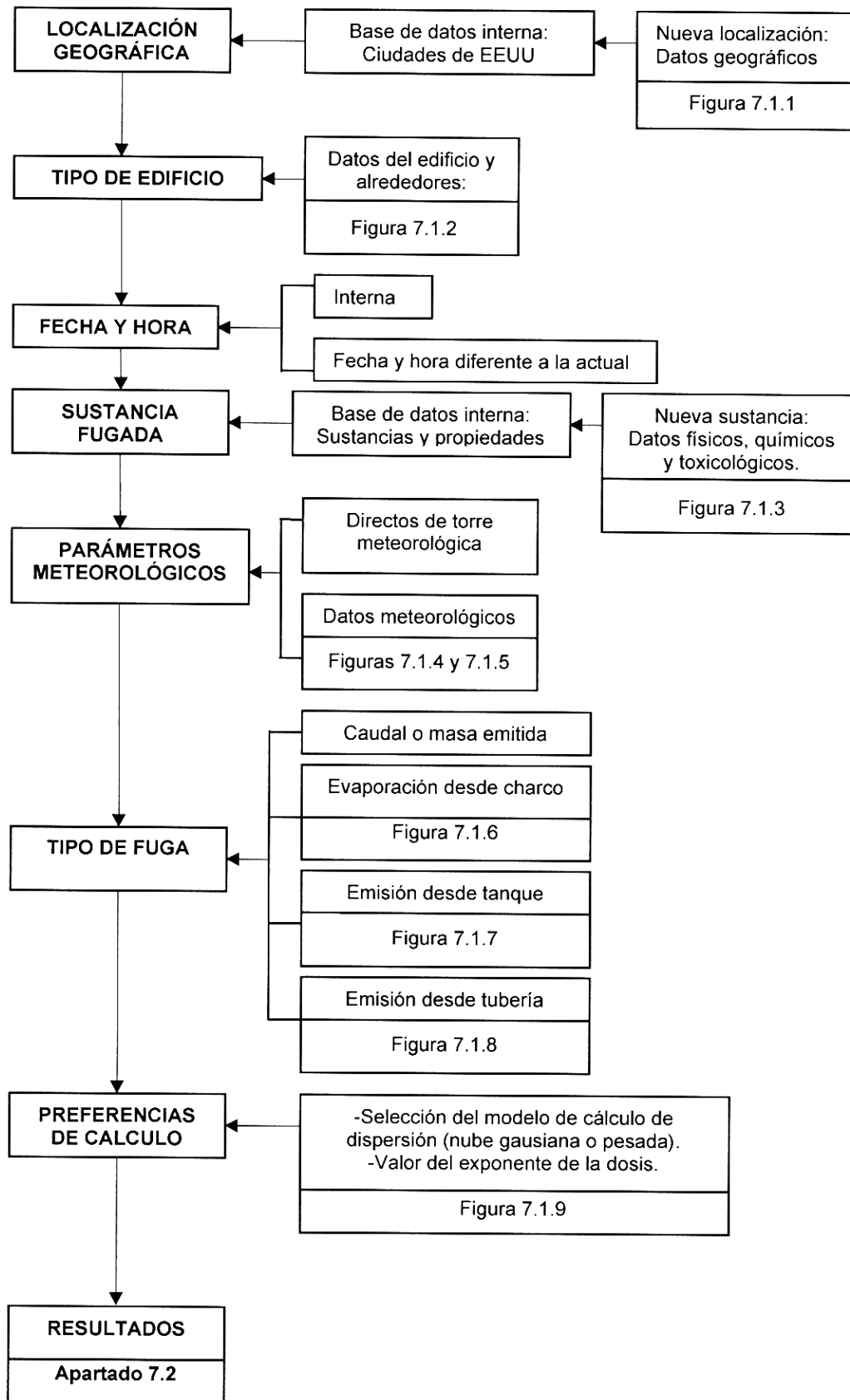


Figura 7.1. Secuencia general de los datos necesarios para ejecutar el programa ALOHA.

7.1. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA Y DATOS DE ENTRADA

En la actualidad, el programa se puede descargar en la dirección siguiente: <http://www.epa.gov/ceppo/cameo/aloha.htm>

La secuencia y datos necesarios para la ejecución del programa son los que se indican en la figura 7.1.

Información solicitada:

- **Localización geográfica del accidente:** El programa dispone de una base de datos que contiene las ciudades más importantes de los Estados Unidos, siendo ampliable a cualquier otra ubicación necesitando introducir los datos de la figura 7.1.1.

The screenshot shows a dialog box titled "Location Input" with the following fields and options:

- Enter full location name:** A text input field labeled "Location is".
- Is location in a U.S. state or territory ?** Two radio buttons: "In U.S." and "Not in U.S." (selected).
- Enter approximate elevation**: A text input field labeled "Elevation is" followed by two radio buttons: "ft" (selected) and "m".
- Enter approximate location**:
 - Latitude**: Two input fields for "deg." and "min.", followed by radio buttons "N" (selected) and "S".
 - Longitude**: Two input fields for "deg." and "min.", followed by radio buttons "E" and "W" (selected).
- Buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

Figura 7.1.1. Datos solicitados para la localización geográfica del accidente.

- **Incidencia en el interior de un edificio:** Si se desea determinar la concentración de la sustancia fugada en el interior de un edificio se selecciona la opción «*Building Type*» de la barra de herramientas y se introducen los datos indicados en la figura 7.1.2.
- **Fecha y hora del accidente:** Esta información junto con la localización geográfica sirve para determinar la altura solar, necesaria para que el programa establezca la clase de estabilidad atmosférica. Se puede seleccionar la fecha y hora actual utilizando el reloj interno del ordenador o cualquier otra especificada por el usuario.

Infiltration Building Parameters

Select building type or enter exchange parameter

Enclosed office building Help

Single storied building

Double storied building

No. of air changes is per hour

Select building surroundings Help

Sheltered surroundings (trees, bushes, etc.)

Unsheltered surroundings

Figura 7.1.2. Datos solicitados para determinar la incidencia de la nube tóxica en el interior de un edificio.

- **Sustancia involucrada:** La base de datos cuenta con unas mil sustancias y permite la introducción de cualquier otra, solicitando para ello los datos indicados en la figura 7.1.3. Además de las propiedades que aparecen en la figura se solicita también la presión de vapor de la sustancia.

Input Available Information

Chemical Name:

Molecular Weight:

Boiling Point (normal) Boiling Point Value:

Critical Pressure

Critical Temperature

Default Level of Concern

Density [gas]

Density [liquid]

Diffusivity [molecular]

Freezing Point (normal)

Heat Cap.[gas,const.press.]

Heat Cap.[liq.,const.press.]

IDLH

TLV-TWA

Kelvin ▼

Figura 7.1.3. Propiedades solicitadas para incorporar en la base de datos una sustancia nueva.

- **Parámetros meteorológicos:** En la figura 7.1.4 se indican las variables meteorológicas solicitadas que junto con la altura solar (determinada internamente) sirven para que el programa establezca la clase de estabilidad.

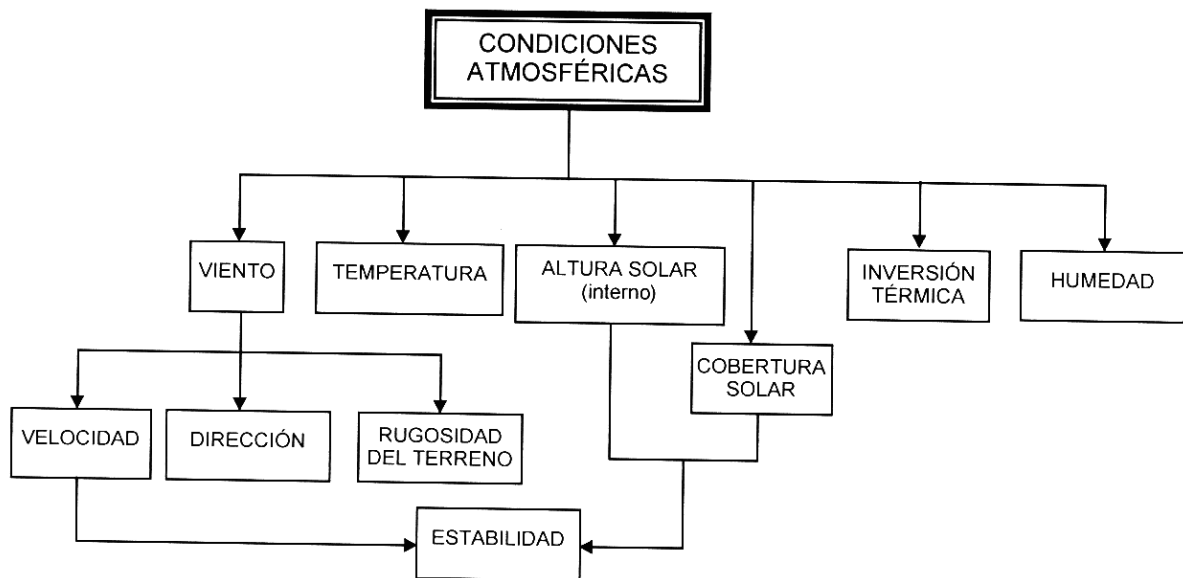


Figura 7.1.4. Secuencia para determinar la clase de estabilidad atmosférica.

Las figura 7.1.5 muestra las ventanas disponibles para la introducción de los datos de la figura 7.1.4



- **Datos para determinar la masa o caudal de fuga.** Las opciones disponibles son las siguientes:
 - **Directa:** este caso se utiliza cuando el usuario conoce la cantidad o caudal emitido, introduciendo dicho dato de forma directa.
 - **Charco:** en la figura 7.1.6 se muestran las ventanas donde se introducen los datos necesarios para que el programa determine el caudal de emisión evaporado.
 - **Tanque:** Dado que en este caso se plantean varias alternativas derivadas de las distintas geometrías de los tanques, estado físico de la sustancia, situación y forma del orificio, que dan origen a diferentes ventanas conforme se seleccionan los datos requeridos, se ha preferido recopilar en la figura 7.1.7 la secuencia de las entradas.
 - **Tubería:** en la figura 7.1.8 se indican los parámetros solicitados.

Atmospheric Options

Wind Speed is : Knots MPH Meters/sec

Wind is from : Enter degrees true or text (e.g. ESE)




Measurement Height above ground is:

  OR enter value : Feet Meters

Ground Roughness is :

Open Country Urban or Forest OR Input Roughness (Z₀) : in cm

Select Cloud Cover :

   OR enter value : (0 - 10)

complete cover partly cloudy clear

Atmospheric Options 2




Air Temperature is : Degrees F C

Stability Class is : A B C CD CF EF

Inversion Height Options are :

No Inversion Inversion Present, Height is : Feet Meters

Select Humidity :

   OR enter value : % (0 - 100)

wet medium dry

Figura 7.1.5. Ventanas para la introducción de los datos meteorológicos. El programa determina la clase de estabilidad.

Puddle Input

Puddle area diameter is: square feet yards meters

Select one and enter appropriate data

Volume of puddle
 Average depth of puddle
 Mass of puddle

Average depth is: inches centimeters
 feet meters

Soil Type, Air and Ground Temperature

Select ground type

Default Concrete Sandy Moist

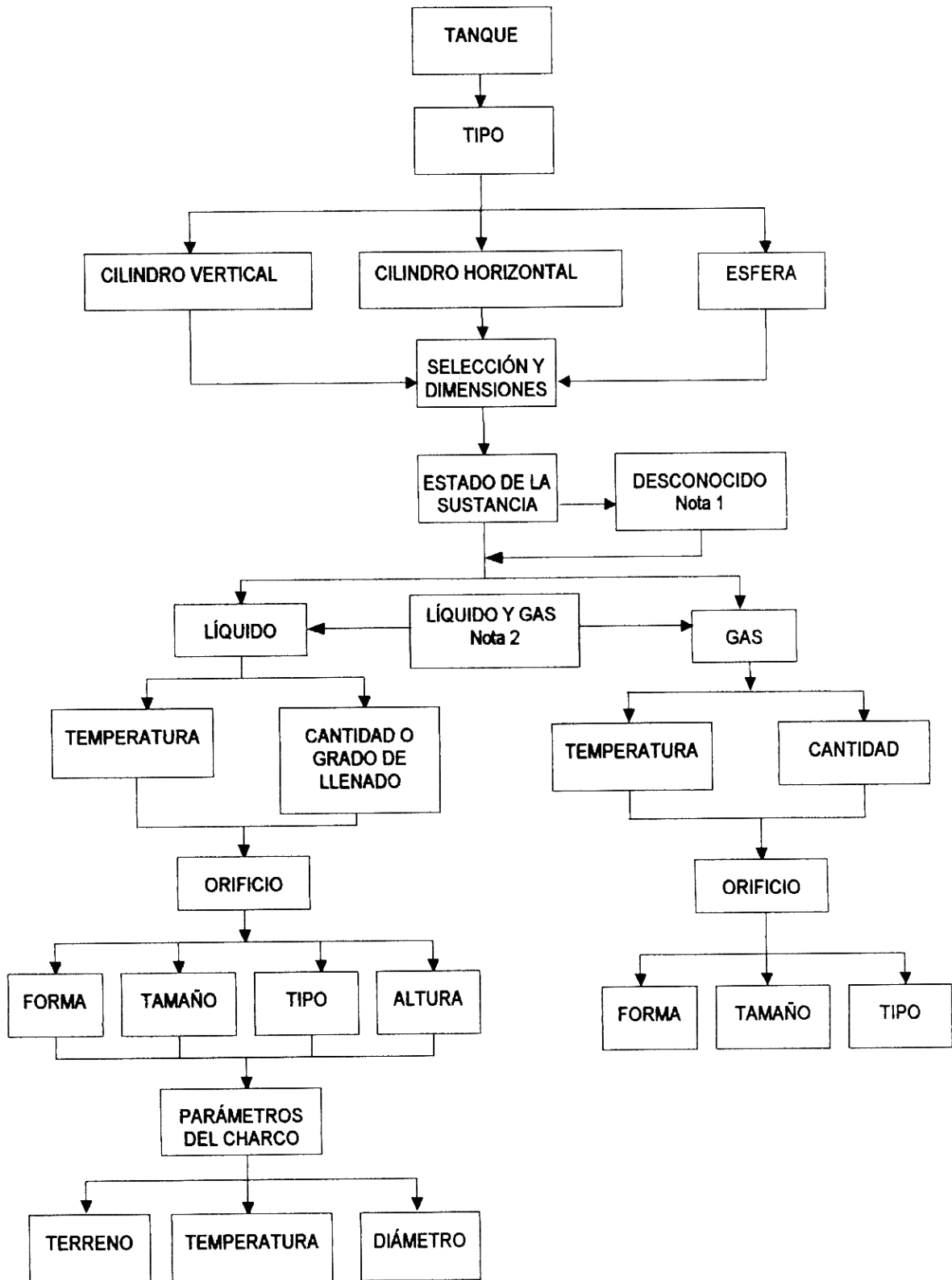
Input ground temperature

Use air temperature (select this if unknown)
 Ground temperature is F C

Input initial puddle temperature

Use ground temperature (select this if unknown)
 Use air temperature
 Initial puddle temperature is F C

Figura 7.1.6. Datos de entrada para determinar el caudal de emisión desde un charco.



Nota 1: El programa decide el estado de la sustancia con los datos disponibles de presión y temperatura.

Nota 2: El programa determina el caudal total emitido.

Figura 7.1.7. Parámetros solicitados para determinar las emisiones cuando el equipo afectado es un tanque.

The image shows two separate dialog boxes from a software application. The first dialog box is titled "Pipe Input" and contains three sections. The first section is "Input pipe diameter" with a text input field, radio buttons for "inches" and "cm" (selected), and a "Help" button. The second section is "Input pipe length" with a text input field, radio buttons for "ft", "yds", and "meters" (selected), and a "Help" button. The third section is "The unbroken end of the pipe is" with radio buttons for "connected to infinite tank source" (selected) and "closed off", and a "Help" button. Below these sections are "OK" and "Cancel" buttons. The second dialog box is titled "Pipe Pressure and Hole Size" and contains three sections. The first section is "Input pipe pressure" with a text input field, radio buttons for "psi", "atm" (selected), and "Pa", and a "Help" button. The second section is "Input pipe temperature" with radio buttons for "Unknown (assume ambient)" and "Temperature is" (selected), a text input field, and radio buttons for "F" and "C" (selected), and a "Help" button. The third section is "Hole size equals pipe diameter." with a "Help" button. Below these sections are "OK" and "Cancel" buttons.

Pipe Input

Input pipe diameter Help

Diameter is inches cm

Input pipe length Help

Pipe length is ft yds meters

The unbroken end of the pipe is Help

connected to infinite tank source
 closed off

Select pipe roughness Help

Smooth Pipe
 Rough Pipe

Pipe Pressure and Hole Size

Input pipe pressure Help

Pressure is psi atm Pa

Input pipe temperature Help

Unknown (assume ambient)
 Temperature is F C

Hole size equals pipe diameter. Help

Figura 7.1.8. Datos de entrada para determinar la cantidad o el caudal de emisión desde una tubería.

Selección del tipo de nube: el programa puede seleccionar el tipo de nube (neutra o pesada) o el propio usuario puede establecer el modelo de dispersión a utilizar (ver figura 7.1.9).

Parámetro n para el cálculo de la dosis: ALOHA calcula la dosis mediante la ecuación de ten Berge, figura 7.1.9. El exponente de la concentración puede ser introducido por el usuario o utilizar el valor por defecto disponible en el programa.

Computational Preferences

Select spreading algorithm. If unsure, let model decide. Help

Let model decide (select this if unsure)
 Use Gaussian dispersion only
 Use Heavy Gas dispersion only

Define dose: Help

Dose = $\int_0^t C^n(t) dt$ n =

Figura 7.1.9. Selección del modelo de dispersión y exponente n para calcular la dosis.

Posición del lugar donde se desea determinar la concentración y la dosis: las ventanas de las figuras 7.1.10A ó 7.1.10B son las alternativas para establecer la posición del punto donde se pretende determinar la concentración y la dosis.

Concentration and Dose Location

Specify the location at which you want to evaluate the concentration and dose over time.

Relative Coordinates (Downwind, Crosswind)
 Fixed Coordinates (East-West, North-South)

Input X, the downwind distance from the source and Y, the perpendicular distance from the downwind axis.

feet
 yards
 miles
 meters
 kilometers

Figura 7.1.10A. Datos de entrada para situar el punto donde se desea determinar la concentración y la dosis, utilizando coordenadas rectangulares.

Concentration and Dose Location

Specify the location at which you want to evaluate the concentration and dose over time.

Relative Coordinates
(Downwind,Crosswind)

Fixed Coordinates
(East-West,North-South)

Input X, the east-west distance from the source and Y, the north-south distance from the source.

Input X: East West

Input Y: North South

feet
 yards
 miles
 meters
 kilometers

Figura 7.1.10B. Datos de entrada para situar el punto donde se desea determinar la concentración y la dosis, utilizando coordenadas geográficas.

7.2. EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Como se indicó anteriormente, el programa determina la dispersión de nubes neutras o pesadas. En el primer caso utiliza el modelo gaussiano de *Hanna y cols. (1982)*, *Palazzi y cols. (1982)* y en el último, el modelo DEGADIS de *Havens y Spicer (1985)*.

Los resultados se presentan en forma de texto y gráficamente. El texto incluye la siguiente información:

1. Datos introducidos o internos:

- **Información sobre el lugar:** localización, número de renovaciones/hora en el interior del edificio, fecha y hora.
- **Información sobre la sustancia:** nombre, masa molecular, TLV-TWA, IDLH, concentración mínima de referencia, punto de ebullición, presión de vapor y concentración de saturación.
- **Información atmosférica:** velocidad y dirección del viento y altura de la medida, persistencia o no de inversión, clase de estabilidad, temperatura y humedad relativa, rugosidad del terreno y cobertura de nubes.

2. Resultados:

- **Información sobre la emisión:** caudal, duración, altura de la emisión y cantidad total fugada.
- **Información complementaria:** tipo de nube (neutra o pesada), concentración mínima de referencia (LOC), alcance máximo de la concentración LOC.

- **Información dependiente del tiempo:** concentración y dosis estimadas en el punto seleccionado. Concentraciones y dosis máximas en el exterior e interior del edificio.

Los resultados gráficos presentados son los siguientes:

- **Isopleta de la concentración LOC en el diagrama x-y:** figura 7.2.
- **Perfil concentración-tiempo para la posición especificada por el usuario:** figura 7.3.
- **Perfil dosis-tiempo para la posición especificada por el usuario:** figura 7.4.
- **Perfil caudal de fuga - tiempo:** figura 7.5.

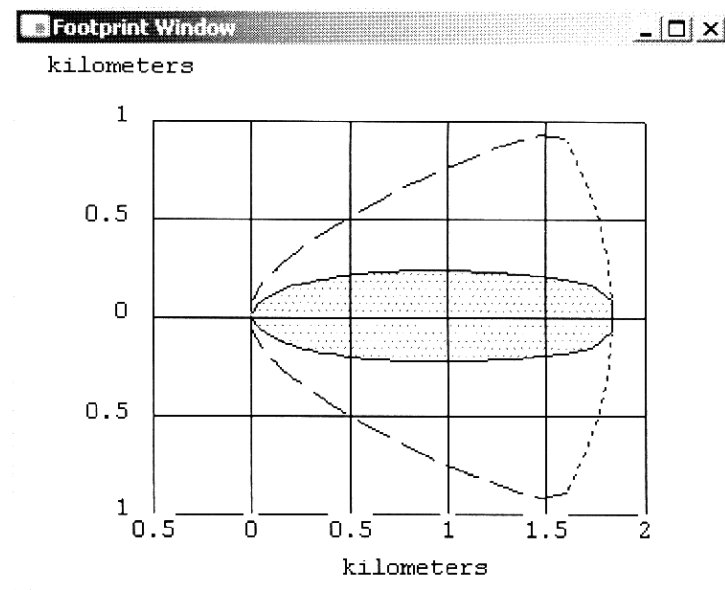


Figura 7.2. Isopleta correspondiente al valor LOC.

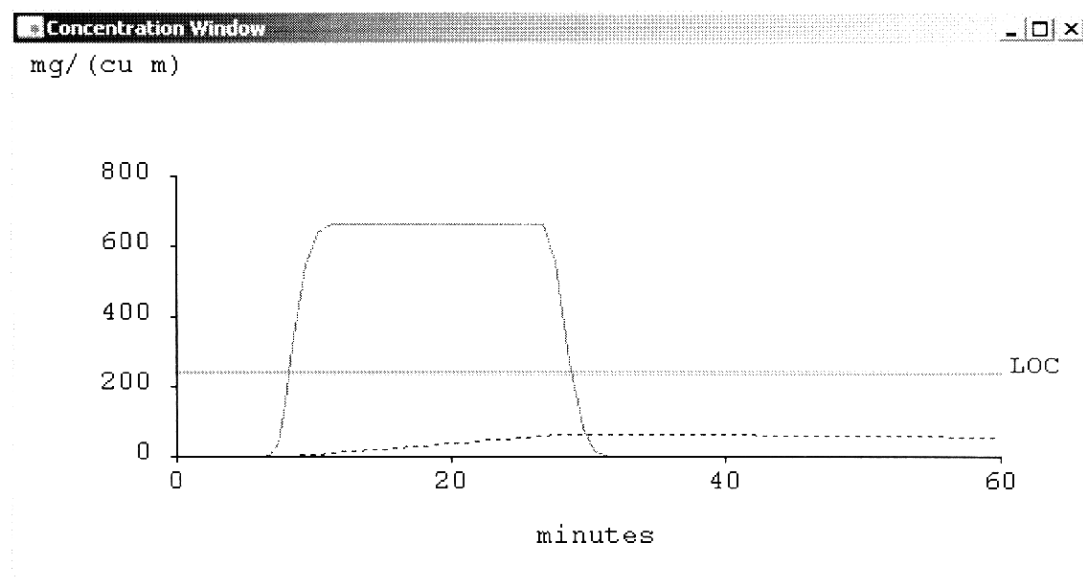


Figura 7.3. La línea continua corresponde al perfil concentración-tiempo para una determinada posición, en el exterior. La línea discontinua próxima al eje de abscisas es la concentración en el interior del edificio seleccionado.

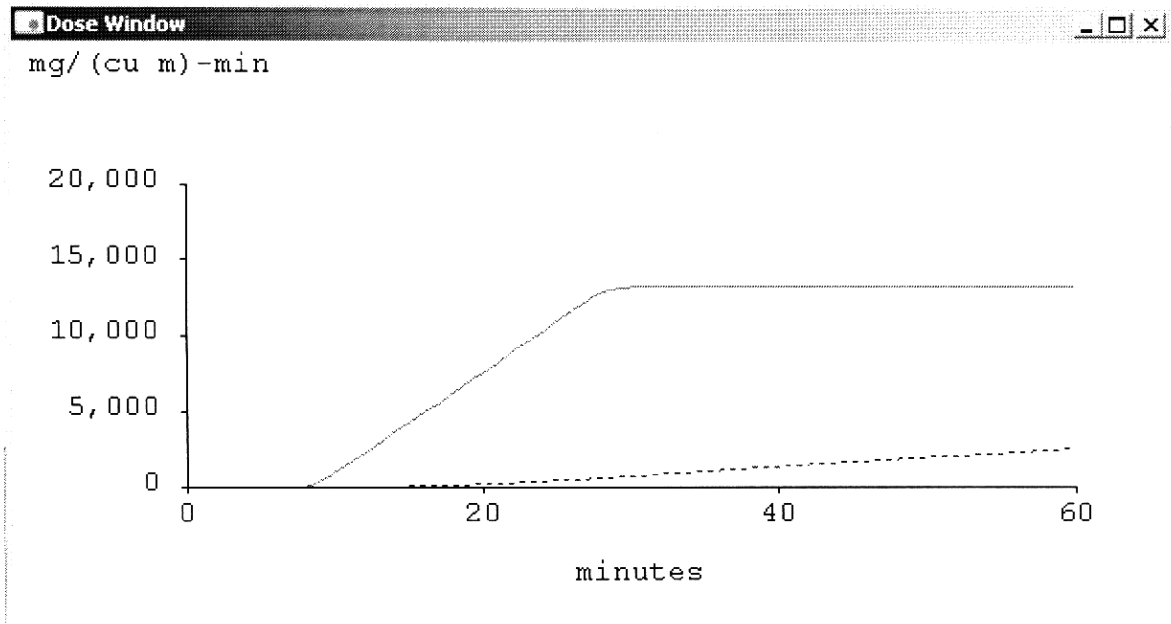


Figura 7.4. Perfil dosis-tiempo para una determinada posición, en el exterior. La línea discontinua próxima al eje de abscisas es la dosis en el interior del edificio seleccionado.

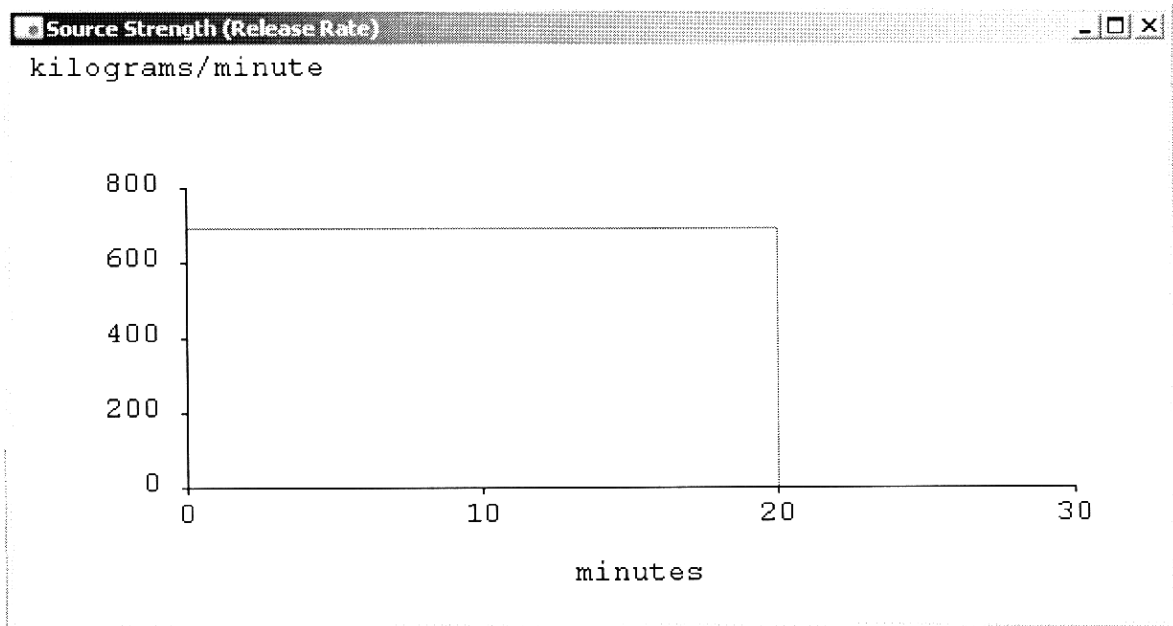


Figura 7.5. Perfil caudal de fuga-tiempo.

7.3. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EPA (1999). *ALOHA User's Manual*. U.S. Environmental Protection Agency. National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington.
- Hanna, S.R., Briggs, G.A.; Hosker, R.P. (1982). *Handbook on atmospheric diffusion*. Report DOE/TIC-11223. Technical Information Center, U.S. Department of Energy. Oak Ridge, Tennessee.
- Palazzi, E.; De Faveri, M.; Fumarola, G.; Ferraiolo, G.; (1982). *Diffusion from a steady source of short duration*. Atmospheric Environment 16(12):2785-2790.
- Havens, J. A.; Spicer, T. O.; (1985). *Development of an atmospheric dispersion model for heavier-than-air gas mixtures*. US Coast Guard Report, CG-D-22-85, vols. I, II, III.

Aplicación práctica de la metodología para determinar las zonas de planificación

En este apartado se expone mediante ejemplos la metodología propuesta en el capítulo 6, lo que permite explicar secuencialmente cada una de las etapas que conlleva la determinación de las zonas de planificación.

Las diferencias metodológicas de los distintos casos dependen del valor límite disponible para la sustancia estudiada, planteándose las siguientes posibilidades:

1. Sustancia que dispone del índice AEGL. Se ha seleccionado **el cloruro de hidrógeno**, evaluándose dos hipótesis accidentales: una fuga semicontinua de 20 minutos de duración y otra prácticamente instantánea.
2. Sustancia sin índice AEGL pero que dispone de ERPG. Se ha seleccionado el **amoniaco** analizándose una fuga instantánea.
3. Sustancia que dispone exclusivamente del índice TEEL. Se ha seleccionado el **isopreno**, considerándose un derrame, formación de un charco y evaporación desde el mismo durante 20 minutos.

En todos los casos se establecen dos situaciones atmosféricas: la considerada más desfavorable (clase de estabilidad F y 2 m/s de velocidad media del aire) y la más frecuente (habiéndose supuesto la clase D y 2.5 m/s).

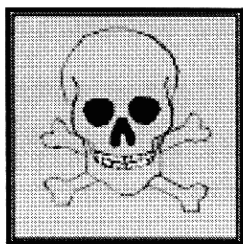
8.1. SUSTANCIA CON AEGL

Sustancia seleccionada: Cloruro de hidrógeno

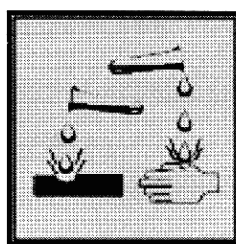
Nº CAS: 7647-01-0

Características peligrosas –MTAS–. El cloruro de hidrógeno es un gas incoloro, muy irritante y corrosivo. A baja temperatura, el contacto con la piel en estado gaseoso o licuado, causa quemaduras por congelación y lesiones severas. Sus efectos agudos sobre el sistema respiratorio comienzan a partir de 10 ppm. Es una sustancia muy soluble en agua dando lugar a un ácido fuerte (ácido clorhídrico), responsable de la formación de brumas en condiciones ambientales con elevada humedad, provocando irritaciones en los ojos y en el tracto respiratorio superior y medio.

Etiquetas de clasificación como sustancia peligrosa:



T



C

R23: Tóxico por inhalación.

R35: Provoca quemaduras graves.

El cloruro de hidrógeno, bajo el estado de gas licuado está específicamente citado como sustancia peligrosa en la Parte 1 del Anexo I del Real Decreto 1254/1999 –R.D. 1254-1999–.

Los valores del índice AEGL del cloruro de hidrógeno se indican en la tabla 8.1.1 y se representan en la figura 8.1.1

TABLA 8.1.1. Valores del índice AEGL para el cloruro de hidrógeno, expresados en mg/m^3

AEGL	10 min.	30 min.	1 h.	4 h.	8 h.
1	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
2	150	64.5	33	8.1	4.05
3	930	315	150	39	19.5

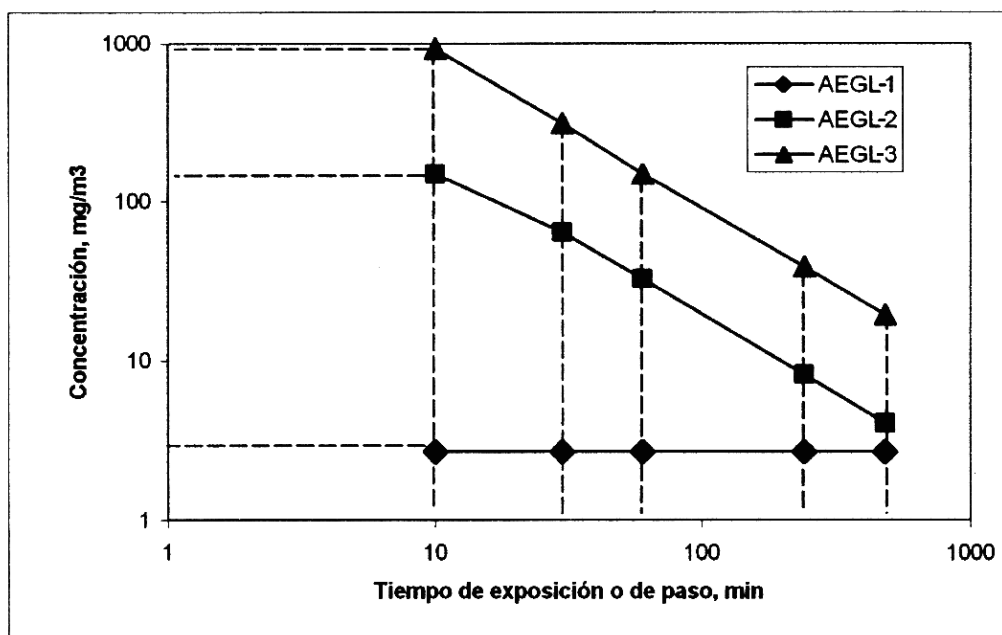


Figura 8.1.1. Representación de los valores del índice AEGL para el cloruro de hidrógeno.

Comentarios sobre los índices del cloruro de hidrógeno:

1. **El AEGL-1** es constante para todos los periodos establecidos; así pues, para este nivel de daño la sustancia tiene una concentración techo. **Este índice define el límite inferior de la zona de alerta.**
2. **El AEGL-2** sigue prácticamente la ley de Haber:

$$D = c.t = 1935 \text{ (mg/m}^3\text{)min} \quad (8.1)$$

Conviene recordar que para periodos inferiores a 10 minutos, la concentración debe ser la asignada al período de 10 minutos (150 mg/m³), salvo que se disponga de información toxicológica adicional que garantice la extrapolación (lo que conduciría a concentraciones mayores a la anterior). **Este índice establece el límite inferior de la zona de intervención.**

3. **El AEGL-3** sigue prácticamente la ley de Haber:

$$D = c.t = 9300 \text{ (mg/m}^3\text{).min} \quad (8.2)$$

Cuando la dosis supere el valor anterior pueden producirse efectos irreversibles y letales.

De la misma forma que para el AEGL-2, para tiempos inferiores a 10 minutos se mantiene el valor del correspondiente AEGL para este periodo como valor techo (ver figura 8.1.1).

Se ha tomado el valor de 2.7 mg/m³ como concentración mínima de referencia para determinar el tiempo de paso de la nube en cada uno de los enclaves considerados, que corresponde al AEGL-1 para 8 horas, aunque en este caso es extensivo a los demás periodos de este último índice, al tratarse de un “valor techo”.

8.1.1. Escenario HCl-1. Fuga continua de cloruro de hidrógeno

Escenario accidental supuesto:

En una planta de obtención de cloruro de hidrógeno a partir de hidrógeno y cloro gaseosos se supone la rotura de una tubería auxiliar de pequeño tamaño conectada a un stripper que contiene la sustancia en fase gas a -5°C y 2 atm. Los responsables de la planta estiman que la fuga sería detectada y controlada en un tiempo no superior a 20 minutos. Dadas la baja temperatura de la sustancia y su masa molecular, superior a la del aire, la emisión se comporta como un gas denso.

En la tabla 8.1.2 se indican los datos de entrada al programa ALOHA para calcular el **caudal de emisión.**

Resultados de la simulación de la emisión:

Caudal: 11 kg/min, que se mantiene constante al suponer que la tubería está conectada a un equipo de elevada capacidad de almacenamiento con relación a la cantidad total fugada.

TABLA 8.1.2. Datos de la tubería necesarios para el cálculo de la fuga

LOCALIZACIÓN:	Ubicación X, 8 de marzo, 21:00 h
INFORMACIÓN DE LA SUSTANCIA: (Disponible en la base de datos del programa)	
Nombre:	Cloruro de hidrógeno
Peso molecular	36.46 kg/kmol
Punto de ebullición	-85 °C
Concentración mínima de referencia (LOC)	2.7 mg/m ³
INFORMACIÓN ATMOSFÉRICA: (No influye sobre el cálculo de la fuga)	
Viento	2 m/s a 10 m de altura y dirección N
Estabilidad Pasquill	F
Temperatura	20 °C
Humedad relativa	50 %
Rugosidad del terreno	Campo abierto
Cobertura solar	0/10
DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA FUGA:	
Diámetro de la tubería	4 cm
Longitud :	17 m
Temperatura de la tubería	-5°C
Presión de la tubería	2.10 ⁵ Pa.
Tipo de tubería	Rugosa
Área de fuga	12.6 cm ²
Tubería conectada a una <i>fente de elevada capacidad</i> (definido en el programa como "fuente infinita")	

8.1.1.1 Escenario HCl-1.1. Dispersión de una nube semicontinua en las condiciones atmosféricas más desfavorables

En la tabla 8.1.3 se indican los datos de entrada al módulo de dispersión del programa ALOHA. La información sobre la sustancia y condiciones atmosféricas son las indicadas en la tabla 8.1.2.

En la figura 8.1.2 se han seleccionado algunos perfiles concentración-tiempo de la nube, concretamente a 500, 1000, 3000 y 5000 metros del origen del accidente y en la tabla 8.1.4 se detallan las concentraciones máximas y tiempos de paso para todas las distancias evaluadas.

TABLA 8.1.3. Datos de entrada al programa para simulación de la dispersión

CARACTERÍSTICAS DE LA FUGA:	
Caudal de fuga	11 kg/min
Altura de la fuga	0
Duración	20 min.
Cantidad total fugada	220 kg
OPCIONES DE VISUALIZACIÓN	
LOC	2.7 mg/m ³
Coordenadas para determinar los perfiles concentración-tiempo	X = 500, 1000, 3000, 4000, 5000, 5500 m Y = 0 m

Puede observarse:

1. Los perfiles tienen forma de “meseta”, aunque conforme aumenta la distancia al origen del accidente disminuyen los períodos de las concentraciones máximas. Así, el perfil a 5000 m tiene una morfología casi gaussiana, desapareciendo la zona de concentración constante.
2. Los tiempos de paso de las nubes son casi constantes hasta distancias superiores a 4000 m, pero a partir de dicho punto disminuyen con rapidez.

La concentración LOC indicada en las tablas 8.1.2 y 8.1.3 y la figura 8.1.2 (2.7 mg/m³) corresponde a la concentración mínima de referencia utilizada para determinar los tiempos de paso de las nubes por todos los enclaves.

(Las líneas punteadas próximas a las abscisas de la figura 8.1.2 son probables perfiles concentración-tiempo en el interior de edificaciones situadas en los diferentes enclaves evaluados).

TABLA 8.1.4. Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente HCl-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)

Distancia (m)	$c_{máxima}$ (mg/m ³)	t_p (minutos)
500	184	23.1
1000	63.5	24.2
3000	9.1	23.1
4000	5.3	20,0
5000	3.5	14.2
5500	2.9	6.9

Siguiendo la secuencia propuesta en el capítulo 6, en la figura 8.1.3 se representan las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube de la tabla 8.1.4, conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2 –ver la tabla 8.1.1–. Los puntos de corte de ambas re-

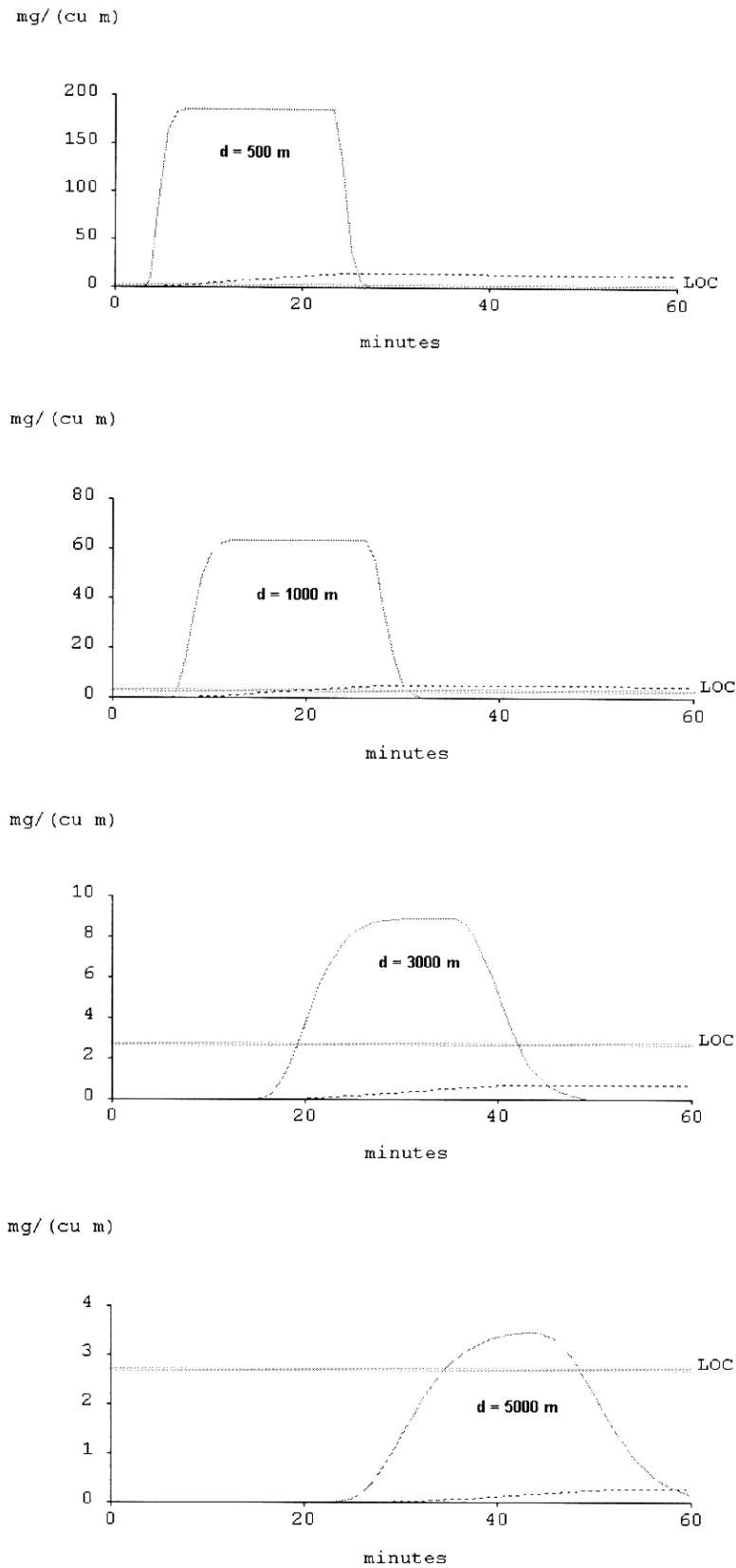


Figura 8.1.2. Perfiles concentración – tiempo de la nube a 500, 1000, 3000 y 5000 m del origen del accidente HCl-1 para las condiciones atmosféricas más desfavorables (Estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento).

presentaciones establecen las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (AEGL-2) y alerta (AEGL-1). Dichas concentraciones máximas se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

Datos del límite de intervención:

- Concentración máxima: **84 mg/m³**.
- Tiempo de paso de la nube: **24 minutos**.
- Distancia desde el origen del accidente: **830 metros**.

Datos del límite de alerta:

- Concentración máxima: **2.7 mg/m³**
- Tiempo de paso de la nube: En este caso, la línea concentración máxima-tiempo de paso y el AEGL-1 se cortarían en t =0 dado que este último índice permanece constante –valor techo– y es, a su vez, la concentración mínima de referencia para determinar los tiempos de paso de la nube.
- Distancia desde el origen del accidente: **5600 metros**.

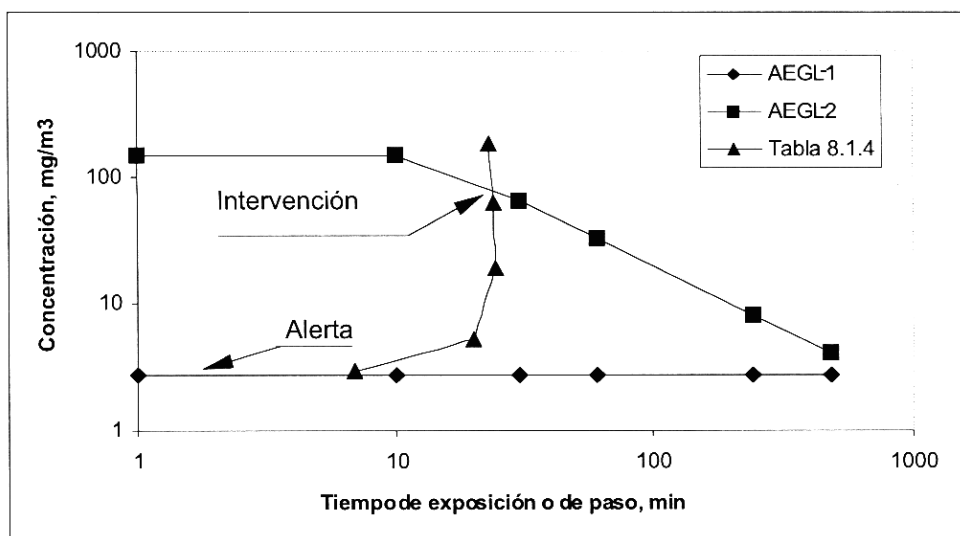


Figura 8.1.3. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de exposición y de paso de la nube del escenario HCl-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables, conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2. Los puntos de corte permiten determinar las zonas de planificación para este accidente.

El programa ALOHA proporciona gráficamente las extensiones superficiales de las nubes a nivel de suelo, figuras 8.1.4 y 8.1.5, limitadas por las concentraciones máximas de interés (en este caso 84 y 2.7 mg/m³), complementándolas con zonas de “posible afectación” (líneas discontinuas) como consecuencia de probables desviaciones de la dirección del viento. Estas representaciones son útiles en los casos de evaluaciones accidentales en tiempo real, dado que puede conocerse la dirección del viento, pero a efectos de planificación las zonas

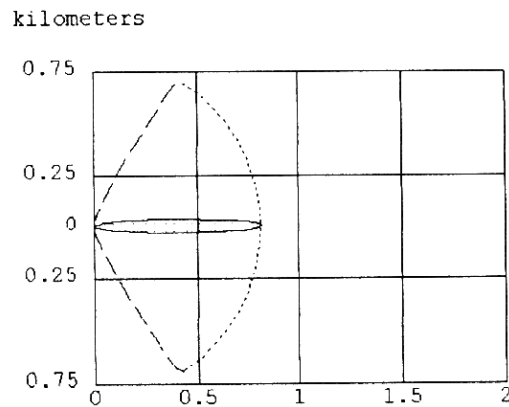


Figura 8.1.4. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de "posible afectación", (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA.

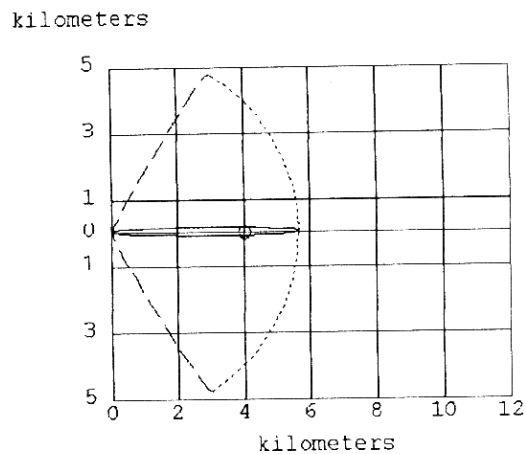


Figura 8.1.5. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de "posible afectación" (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.

a considerar deben ser circulares. Esta cuestión es extensiva a los demás ejemplos, por lo que se desestiman posteriores reiteraciones.

8.1.1.2. Escenario HCl-1.2. Dispersión de una nube semicontinua en las condiciones atmosféricas más frecuentes

En la tabla 8.1.5 se indican los datos de entrada al módulo de dispersión del programa ALOHA. La información sobre la sustancia es la indicada en la tabla 8.1.2.

TABLA 8.1.5. Datos de entrada al programa ALOHA para la simulación de la dispersión

LOCALIZACIÓN	Ubicación X, 8 de marzo, 16:20 h.
INFORMACIÓN ATMOSFÉRICA:	
Viento:	2.5 m/s a 10 m de altura y dirección N
Estabilidad:	D
Temperatura:	20 °C
Humedad relativa:	50%
Rugosidad del terreno:	Campo abierto
Cobertura solar:	10/10
CARACTERÍSTICAS DE LA FUGA:	
Caudal de fuga:	11 kg/min
Altura de la fuga:	0 m
Duración:	20 min.
Cantidad total fugada:	220 kg
OPCIONES DE VISUALIZACIÓN	
LOC	2.7 mg/m ³
Coordenadas relativas para el perfil de concentración-tiempo.	X = 250, 500, 1000, 2000, 2500 y 2825 m
	Y = 0 m

En la figura 8.1.6 se han seleccionado algunos perfiles de la nube, concretamente a 250, 500, 1000, 2500 metros del origen del accidente y en la tabla 8.1.6 se detallan las concentraciones máximas y tiempos de paso para todas las distancias evaluadas. Puede observarse:

1. Al tratarse de nuevo de una fuga semicontinua, la forma de meseta de los perfiles es muy semejante a la observada en el apartado 8.1.1.1, aunque en este caso las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube disminuyen más rápidamente que en el escenario anterior.
2. Los tiempos de paso de las nubes se mantienen prácticamente constantes (en algo más de 21 minutos) hasta 2000 m del origen del accidente, a partir de dicha distancia decrecen bruscamente, como se observa en la tabla 8.1.6. Este comportamiento se produce antes que en el caso anterior (que lo hacía a partir de 4000 m), debido a las condiciones atmosféricas más favorables para la dispersión.

En la figura 8.1.7 se representan las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube de la tabla 8.1.6, conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2 –ver la tabla 8.1.1–. Los puntos de corte de ambas representaciones establecen las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (AEGL-2) y alerta (AEGL-1). Dichas concentraciones máximas se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

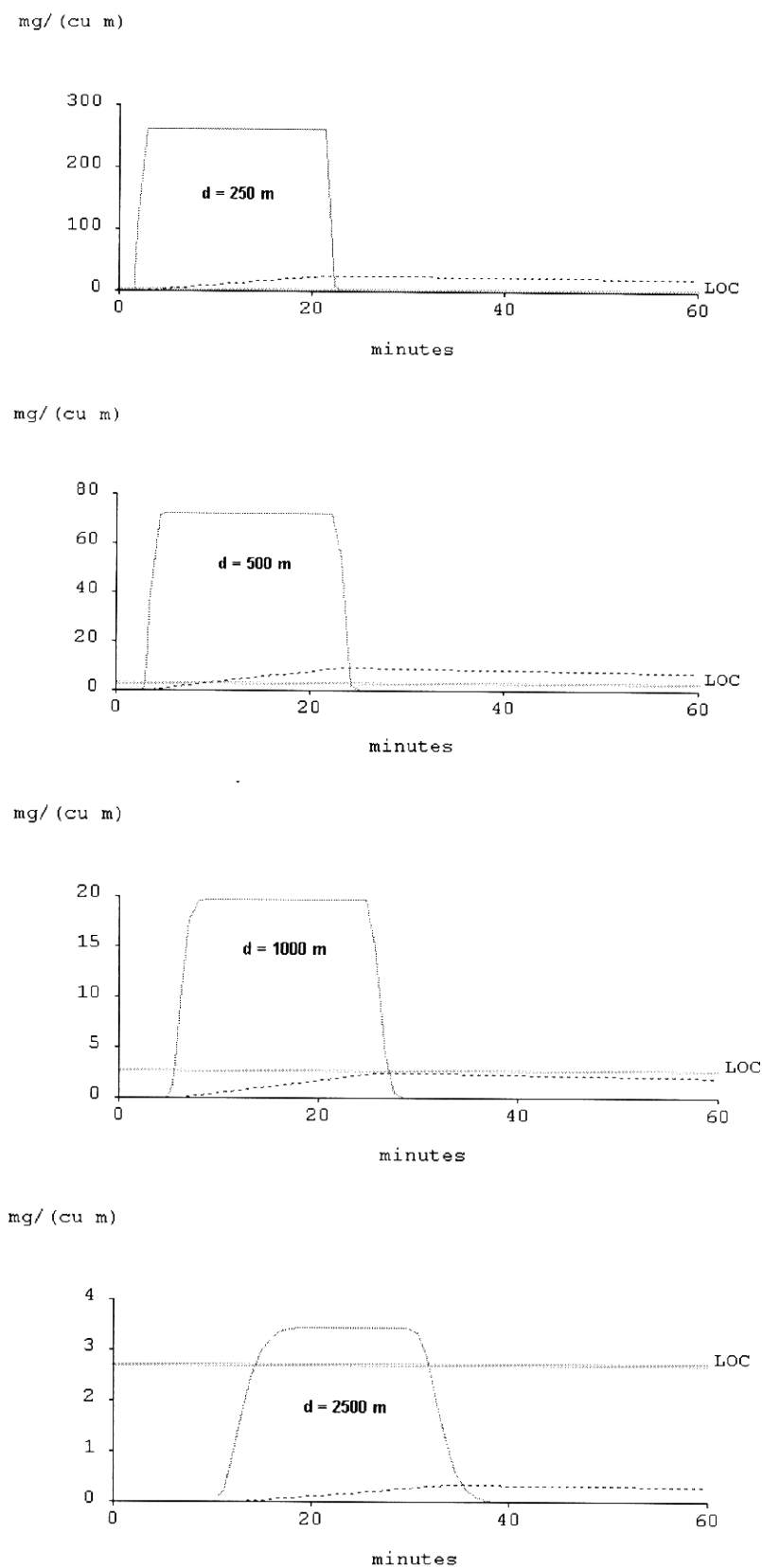


Figura 8.1.6. Perfiles de concentración-tiempo de la nube a 250, 500, 1000 y 2500 m del origen del accidente HCl-1 para las condiciones atmosféricas más frecuentes (Estabilidad D y 2.5 m/s de velocidad de viento).

presencian estas condiciones estables las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (AEGL-2) y alerta (AEGL-1). Dichas concentraciones máximas se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

Datos del límite de intervención:

- Concentración máxima: **84 mg/m³**;
- Tiempo de paso de la nube: **24 minutos**.
- Distancia desde el origen del accidente: **830 metros**.

Datos del límite de alerta:

- Concentración máxima: **2.7 mg/m³**
- Tiempo de paso de la nube: En este caso, la línea concentración máxima-tiempo de paso y el AEGL-1 se cortarían en $t=0$ dado que este último índice permanece constante -valor techo- y es, a su vez, la concentración mínima de referencia para determinar los tiempos de paso de la nube.
- Distancia desde el origen del accidente: **5600 metros**.

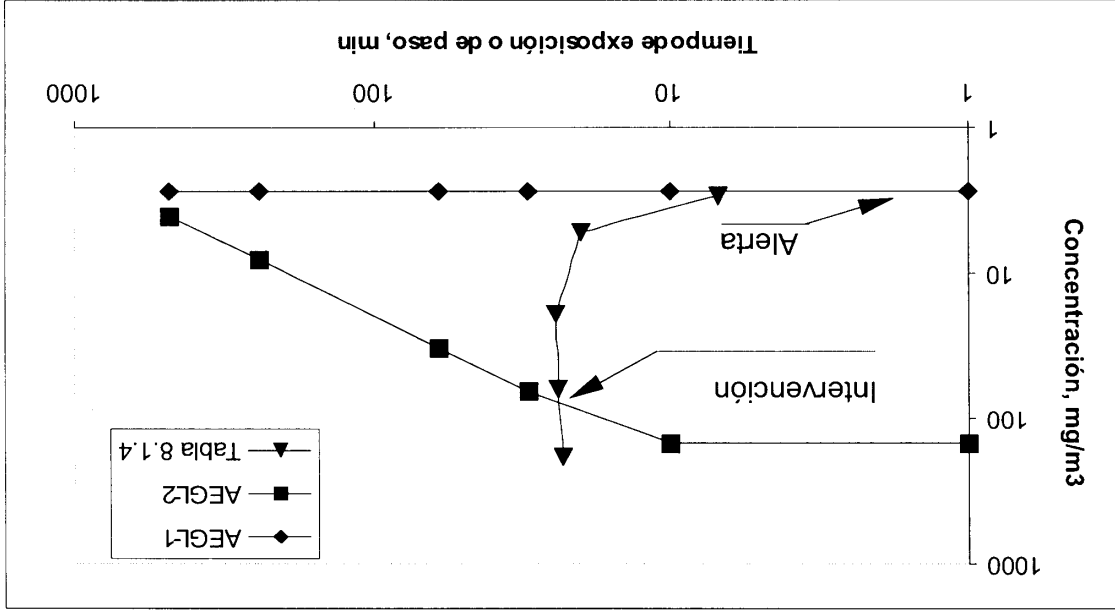


Figura 8.1.3. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de exposición y de paso de la nube del escenario HCl-1 en las condiciones más desfavorables, conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2. Los puntos de corte permiten determinar las zonas de planificación para este accidente.

El programa ALOHA proporciona gráficamente las extensiones superficiales de las nubes a nivel de suelo, figuras 8.1.4 y 8.1.5, limitadas por las concentraciones máximas de interés (en este caso 84 y 2.7 mg/m³), complementándolas con zonas de "posible afectación" (líneas discontinuas) como consecuencia de probables desviaciones de la dirección del viento. Estas representaciones son útiles en los casos de evaluaciones accidentales en tiempo real, dado que puede conocerse la dirección del viento, pero a efectos de planificación las zonas

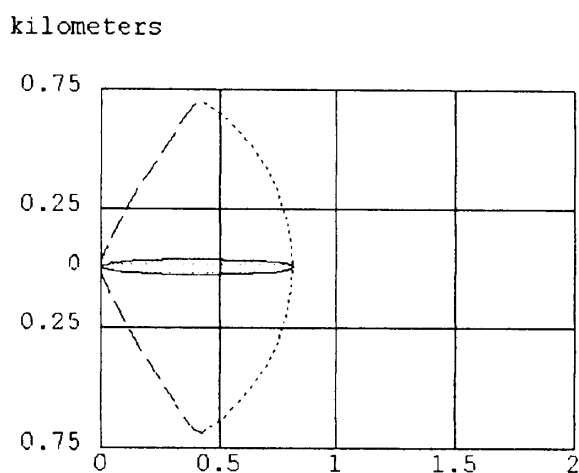


Figura 8.1.4. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de "posible afectación", (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA.

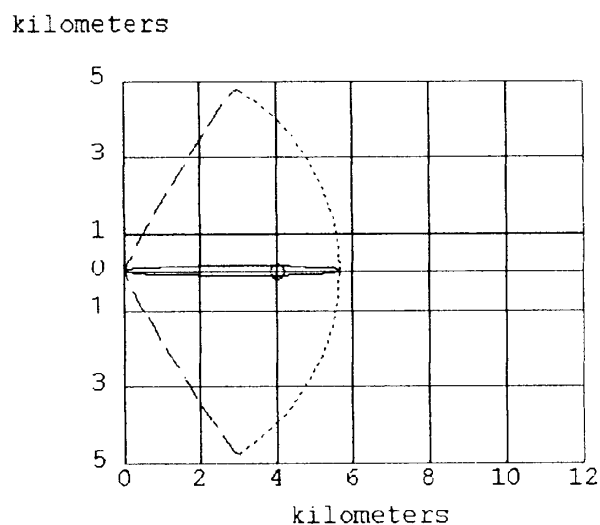


Figura 8.1.5. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de "posible afectación" (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.

a considerar deben ser circulares. Esta cuestión es extensiva a los demás ejemplos, por lo que se desestiman posteriores reiteraciones.

8.1.1.2. Escenario HCl-1.2. Dispersión de una nube semicontinua en las condiciones atmosféricas más frecuentes

En la tabla 8.1.5 se indican los datos de entrada al módulo de dispersión del programa ALOHA. La información sobre la sustancia es la indicada en la tabla 8.1.2.

TABLA 8.1.5. Datos de entrada al programa ALOHA para la simulación de la dispersión

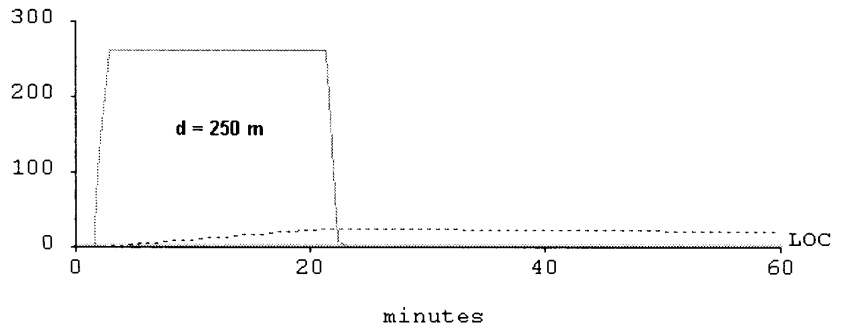
LOCALIZACIÓN	
Ubicación X, 8 de marzo, 16:20 h.	
INFORMACIÓN ATMOSFÉRICA:	
Viento:	2.5 m/s a 10 m de altura y dirección N
Estabilidad:	D
Temperatura:	20 °C
Humedad relativa:	50%
Rugosidad del terreno:	Campo abierto
Cobertura solar:	10/10
CARACTERÍSTICAS DE LA FUGA:	
Caudal de fuga:	11 kg/min
Altura de la fuga:	0 m
Duración:	20 min.
Cantidad total fugada:	220 kg
OPCIONES DE VISUALIZACIÓN	
LOC	2.7 mg/m ³
Coordenadas relativas para el perfil de concentración-tiempo.	X = 250, 500, 1000, 2000, 2500 y 2825 m
	Y = 0 m

En la figura 8.1.6 se han seleccionado algunos perfiles de la nube, concretamente a 250, 500, 1000, 2500 metros del origen del accidente y en la tabla 8.1.6 se detallan las concentraciones máximas y tiempos de paso para todas las distancias evaluadas. Puede observarse:

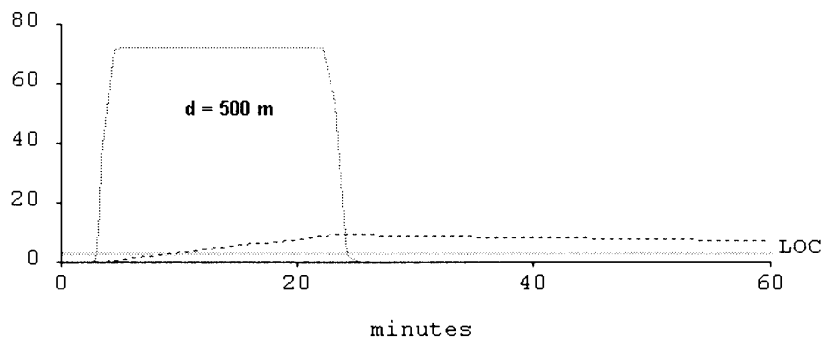
1. Al tratarse de nuevo de una fuga semicontinua, la forma de meseta de los perfiles es muy semejante a la observada en el apartado 8.1.1.1, aunque en este caso las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube disminuyen más rápidamente que en el escenario anterior.
2. Los tiempos de paso de las nubes se mantienen prácticamente constantes (en algo más de 21 minutos) hasta 2000 m del origen del accidente, a partir de dicha distancia decrecen bruscamente, como se observa en la tabla 8.1.6. Este comportamiento se produce antes que en el caso anterior (que lo hacía a partir de 4000 m), debido a las condiciones atmosféricas más favorables para la dispersión.

En la figura 8.1.7 se representan las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube de la tabla 8.1.6, conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2—ver la tabla 8.1.1—. Los puntos de corte de ambas representaciones establecen las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (AEGL-2) y alerta (AEGL-1). Dichas concentraciones máximas se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

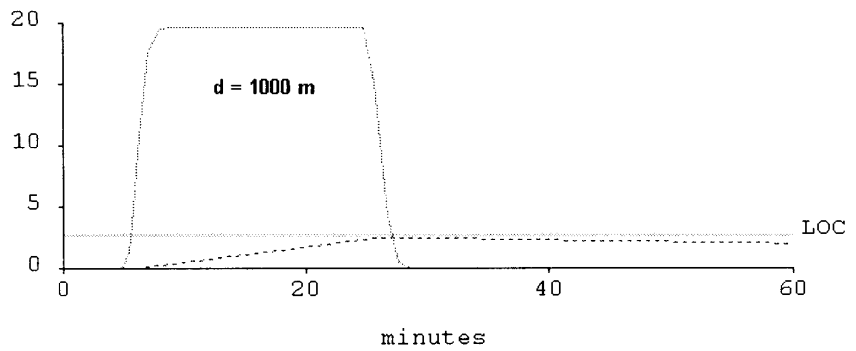
mg/ (cu m)



mg/ (cu m)



mg/ (cu m)



mg/ (cu m)

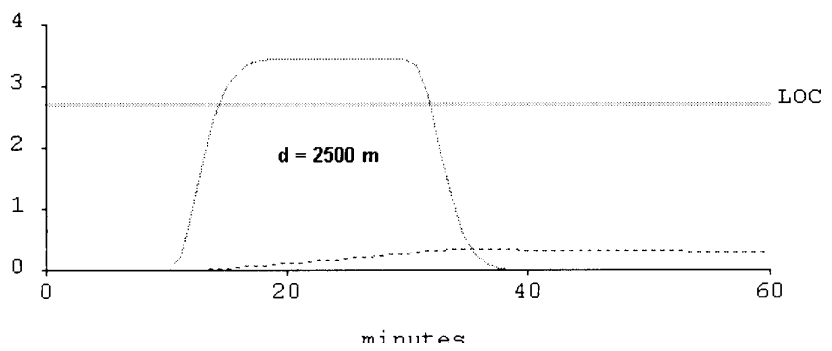


TABLA 8.1.6. Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente HCl-1 en las condiciones más frecuentes (estabilidad D y 2.5 m/s de velocidad de viento)

Distancia (m)	$c^{máxima}$ (mg/m ³)	t_p (minutos)
250	260	21.2
500	72.1	21.2
1000	19.5	21.5
2000	5.2	20
2500	3.4	17.7
2825	2.71	9.6

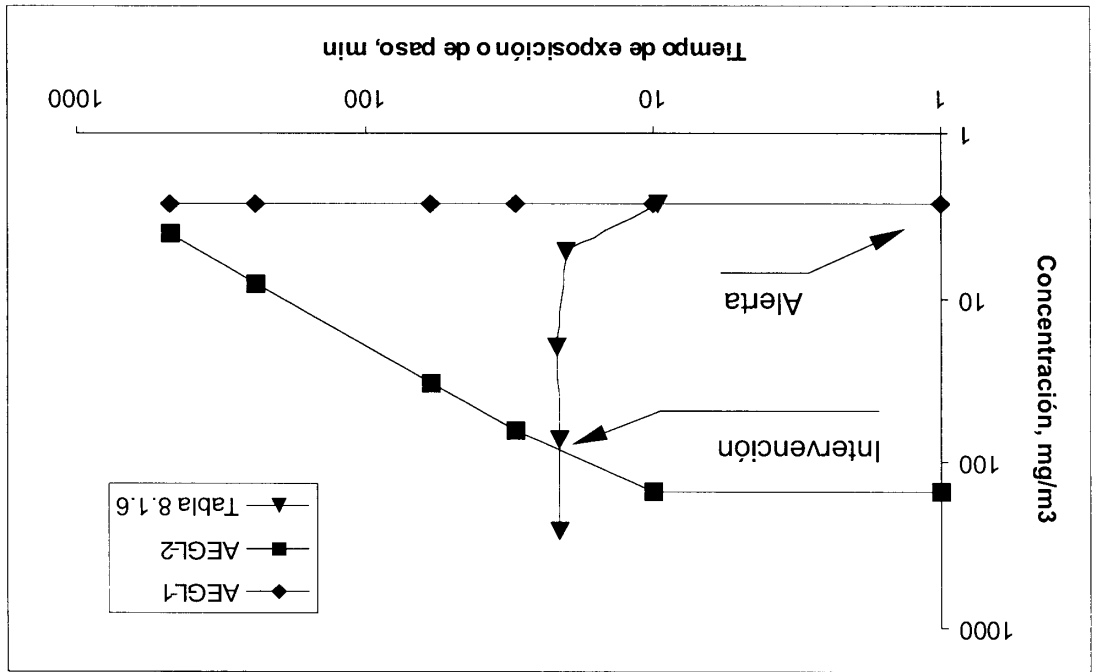


Figura 8.1.7. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube del escenario HCl-1 en las condiciones atmosféricas más frecuentes conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2. Los puntos de corte permiten determinar las zonas de planificación para este accidente.

Datos del límite de Intervención:

- Concentración máxima: 86 mg/m³.
- Tiempo de paso de la nube: 21 minutos.
- Distancia desde el origen del accidente: 455 metros.

Datos del límite de Alerta:

- Concentración máxima: 2.71 mg/m³.
- Tiempo de paso de la nube: En este caso, la línea concentración máxima-tiempo y el AEGL-1 se cortan en $t=0$, dado que este último permanece constante -valor t_e - y es, a su vez, la referencia para determinar el tiempo de paso de la nube.
- Distancia desde el origen del accidente: 2800 metros.

Las figuras 8.1.8 y 8.1.9 muestran las extensiones superficiales de las nubes limitadas por las concentraciones máximas de interés (en este caso 86 y 2.71 mg/m³) junto con zonas de “posible afectación” (líneas discontinuas).

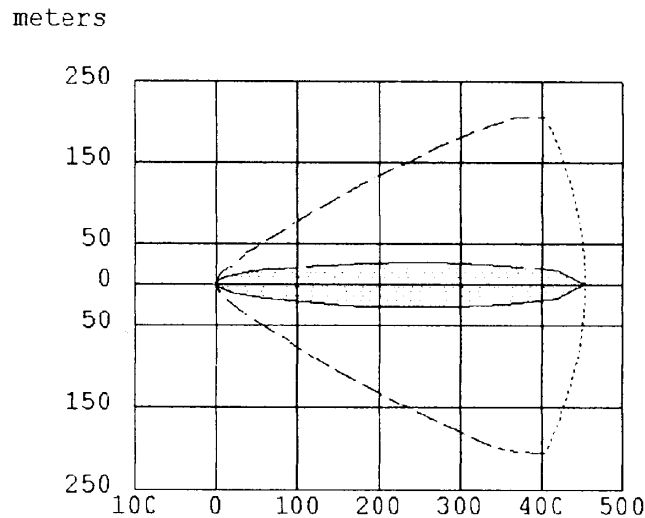


Figura 8.1.8. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.

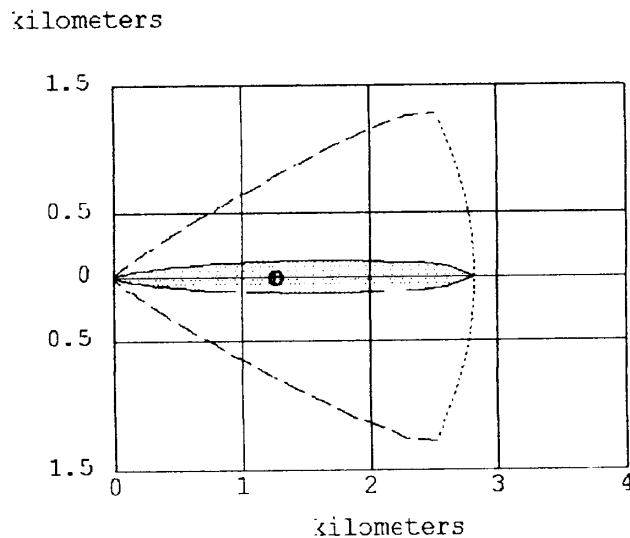


Figura 8.1.9. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.

8.1.2. Escenario HCl-2. Fuga instantánea de cloruro de hidrógeno

Escenario accidental supuesto:

En una planta de obtención de cloruro de hidrógeno a partir de hidrógeno y cloro gaseoso se supone la rotura total de la tubería principal que abandona el stripper que transporta la sustancia a -5°C y 2 atm. La fuga se corta automáticamente al descender la presión

En la tabla 8.1.7 se indican los datos de entrada al programa ALOHA para calcular el caudal de emisión.

TABLA 8.1.7. Datos de la tubería necesarios para el cálculo de la fuga.

LOCALIZACIÓN:		Ubicación X, 12 de enero, 6:00 h
INFORMACIÓN DE LA SUSTANCIA: (Disponible en la base de datos del programa).		
Nombre:	Cloruro de hidrógeno	
Peso molecular (kg/kmol):	36.46	
Punto de ebullición (°C):	-85	
Concentración mínima de referencia (LOC):	2.7 mg/m ³	
INFORMACIÓN ATMOSFÉRICA: (No influyen sobre el cálculo de la fuga)		
Viento:	2 m/s a 10 m de altura y dirección N	
Estabilidad:	F	
Temperatura:	20 °C	
Humedad relativa:	50%	
Rugosidad del terreno:	Campo abierto	
Cobertura solar:	0/10	
DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA FUGA:		
Diámetro de la tubería:	17.5 cm	
Longitud:	40 m	
Temperatura de la tubería:	-5°C	
Presión de la tubería:	2.10 ⁵ Pa.	
Rugosidad tubería:	Rugosa	
Área de fuga:	241 cm ²	
Tubería conectada a una fuente de elevada capacidad (definida en el programa como "fuente infinita")		

Resultados de la simulación de la fuga:

Masa fugada: 349 kg.

8.1.2.1. Escenario HCl-2.1. Dispersión de una nube instantánea en las condiciones atmosféricas más desfavorables

En la tabla 8.1.8 se indican los datos de entrada al módulo de dispersión del programa ALOHA. La información sobre la sustancia y condiciones atmosféricas son las indicadas en la tabla 8.1.7.

TABLA 8.1.8. Datos de entrada al programa para simulación de la dispersión

CARACTERÍSTICAS DE LA FUGA: fuga directa	
Caudal de fuga:	349 kg/min
Altura de la fuga:	0 m
Duración:	1 min
Cantidad total fugada:	349 kg
OPCIONES DE VISUALIZACIÓN	
LOC	2.7 mg/m ³
Coordenadas relativas para el perfil de concentración - tiempo	X = 1000, 2000, 4000, 5000, 6000, 6300, 6450, 6470 m
	Y = 0 m

En la figura 8.1.10 se han seleccionado algunos perfiles de la nube, concretamente a 1000, 4000, 5000 y 6000 metros del origen del accidente en la dirección del viento y en la tabla 8.1.9 se detallan las concentraciones máximas y tiempos de paso para todas las distancias evaluadas.

Puede observarse:

1. Como es previsible en una fuga de corta duración, los perfiles tienen forma gaussiana, cuyas bases se ensanchan y sus alturas disminuyen a medida que se aleja del origen del accidente.
2. Los tiempos de paso de las nubes experimentan un aumento significativo hasta alcanzar 4000 m, y a partir de dicha distancia disminuyen.

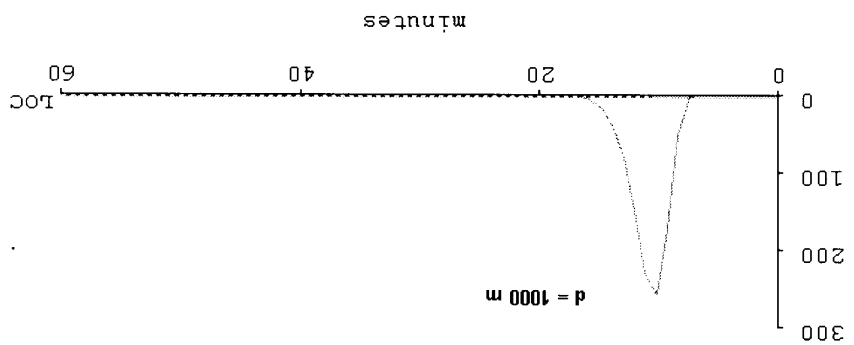
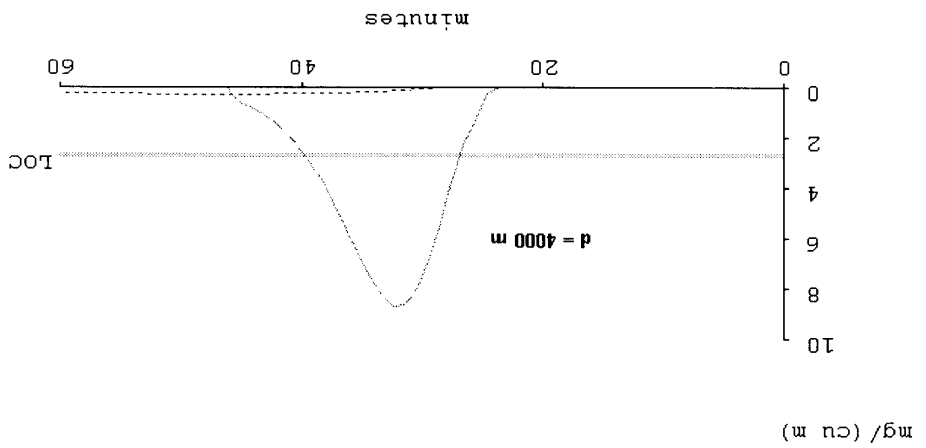
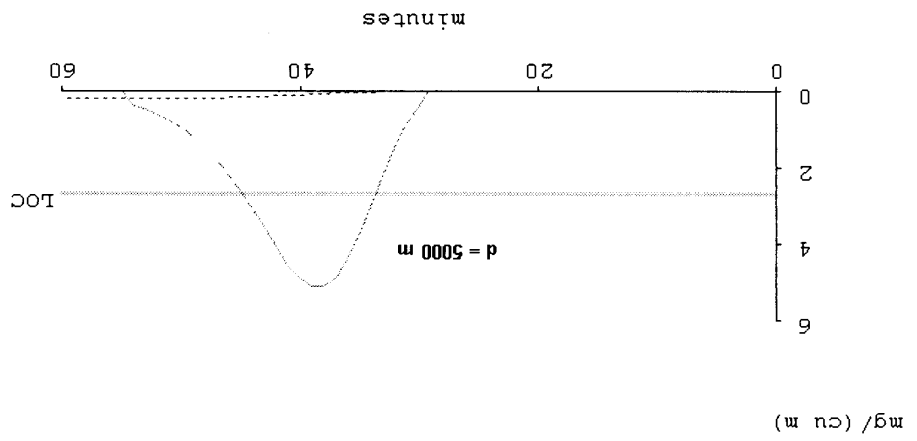
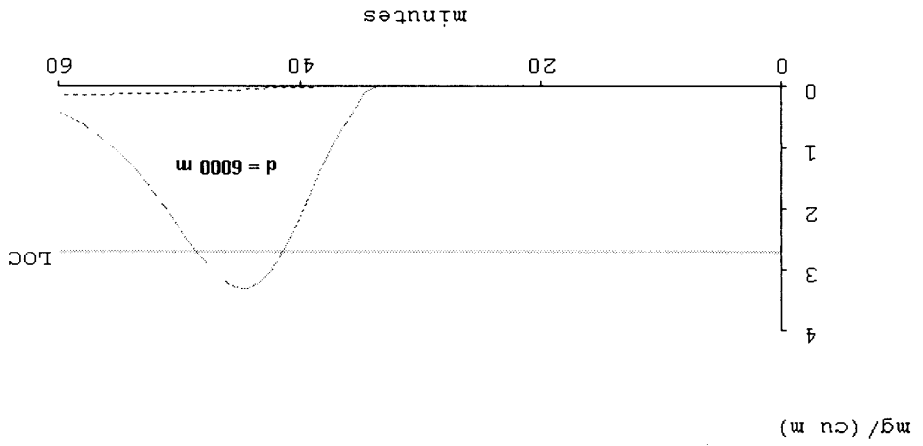
De nuevo, la concentración LOC indicada en la figura 8.1.10 es la concentración mínima de referencia utilizada para la determinación del tiempo de paso de la nube por cada enclave (2.7 mg/m³).

Las líneas punteadas próximas a las abscisas de dicha figura son probables perfiles concentración-tiempo en el interior de edificaciones situadas en los diferentes enclaves evaluados.

TABLA 8.1.9. Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente HCl-2 en las condiciones atmosféricas más desfavorables (Estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)

Distancia (m)	c _{máxima} (mg/m ³)	t _p (min)
1000	257	8.5
2000	46.8	12.3
4000	8.7	13.1
5000	5.1	11.5
6000	3.3	7.3

ura 8.1.10. Perfiles concentración - tiempo de la nube a 1000, 4000, 5000 y 6000 m del origen del accidente para las condiciones atmosféricas más desfavorables (Estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento).



En la figura 8.1.11 se representan las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube de la tabla 8.1.9, conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2 –ver la tabla 8.1.1–. Los puntos de corte de ambas representaciones establecen las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (AEGL-2) y alerta (AEGL-1) para este accidente. Dichas concentraciones máximas se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

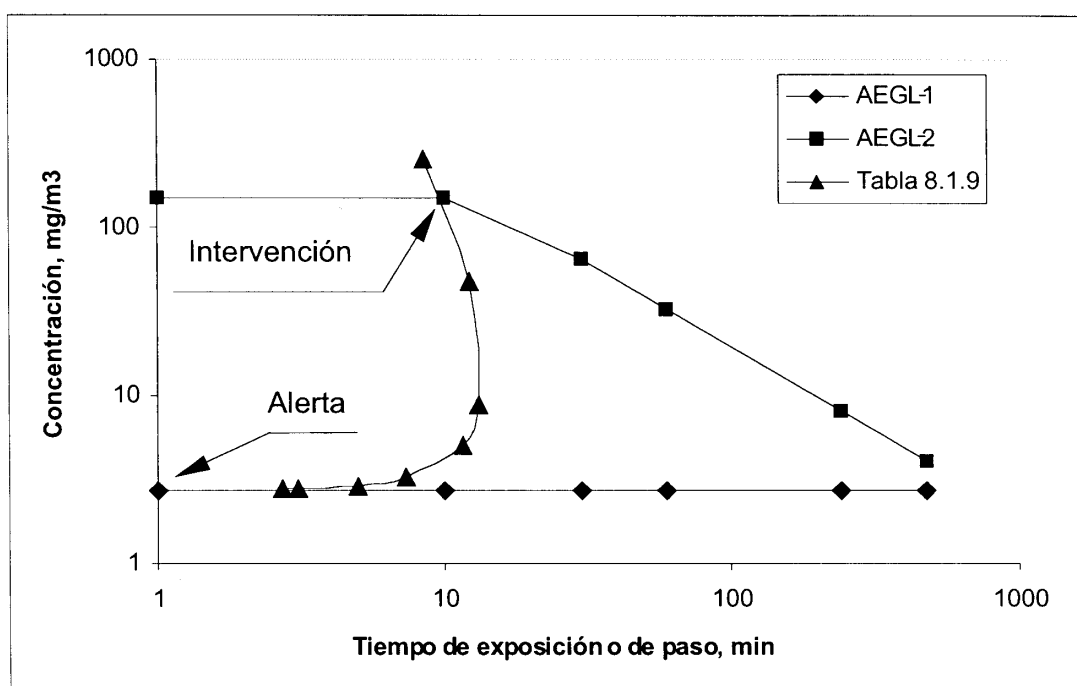


Figura 8.1.11. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de exposición y de paso de la nube del escenario HCl-2 en las condiciones atmosféricas más desfavorables, conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2. Los puntos de corte permiten determinar las zonas de planificación para este accidente.

Datos del limite de Intervención:

- Concentración máxima: **150 mg/m³.**
- Tiempo de paso de la nube: **11.3 min.**
- Distancia desde el origen del accidente: **1200 m**

Datos del limite de Alerta:

- Concentración máxima: **2.7 mg/m³**
- Tiempo de paso de la nube: En este caso, la línea concentración máxima-tiempo y el AEGL-1 se cortarían en $t = 0$, dado que este índice permanece constante –valor techo– y es, a su vez, la concentración mínima de referencia para determinar el tiempo de paso de la nube.
- Distancia desde el origen del accidente: **6500 m**

8.1.2.2. Escenario HCl-2.2. Dispersión de una nube instantánea en las condiciones atmosféricas más frecuentes

En la tabla 8.1.10 se indican los datos de entrada al módulo de dispersión del programa ALOHA. La información sobre la sustancia es la indicada en la tabla 8.1.7

En la figura 8.1.14 se presentan los perfiles de la nube a 1000, 3000, 4000 y 5500 metros del origen del accidente y en la tabla 8.1.11 se detallan las concentraciones máximas y los tiempos de paso.

Puede observarse:

1. Al tratarse de nuevo de una fuga de corta duración, los perfiles tienen forma casi gaussiana, similares a los del escenario HCl-2, haciéndose más anchos y disminuyendo su altura conforme se alejan del origen del accidente.

Figura 8.1.13. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de "posible afectación" (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.

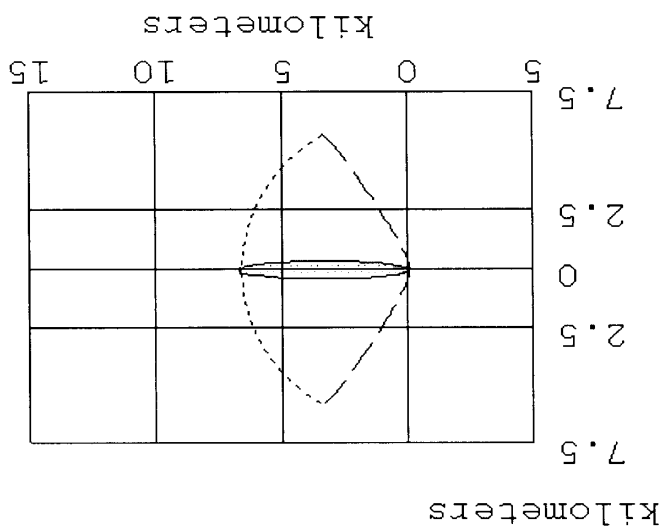
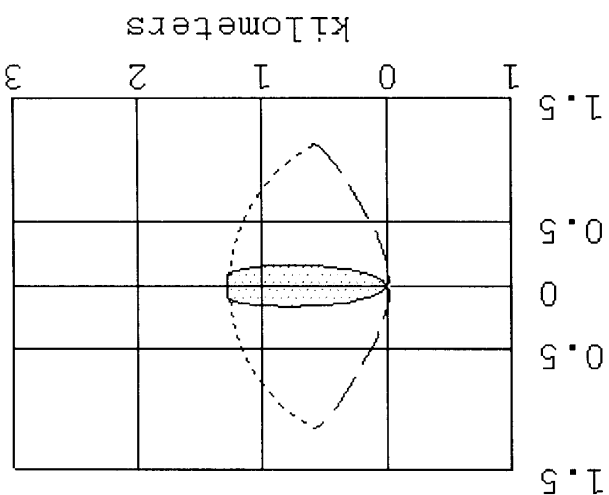


Figura 8.1.12. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de "posible afectación" (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.



2. Los tiempos de paso de las nubes comienzan a disminuir a partir de 3000 m, que es una distancia menor a la del caso anterior, debido a que las características atmosféricas son más favorables para la dispersión.

TABLA 8.1.10. Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión

LOCALIZACIÓN:	Ubicación X, 12 de enero, 16:00 h.
INFORMACIÓN ATMOSFÉRICA: (Disponible en la base de datos del programa)	
Viento:	2.5 m/s dirección N a 10 m de altura
Estabilidad:	D
Temperatura:	20 °C
Humedad relativa:	50%
Rugosidad del terreno:	Campo abierto
Cobertura solar:	10/10
CARACTERÍSTICAS DE LA FUGA:	
Caudal de fuga:	349 kg/min
Altura de la fuga:	0 m
Duración:	1 min
Cantidad total fugada:	349 kg/min
OPCIONES DE VISUALIZACIÓN:	
LOC	2.7 mg/m ³
Coordenadas para determinar los perfiles de concentración -tiempo.	X = 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 y 5500 m Y = 0 m

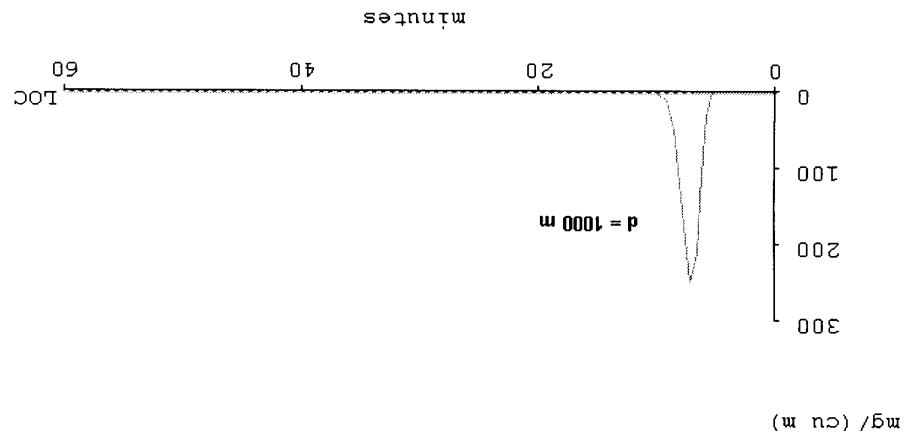
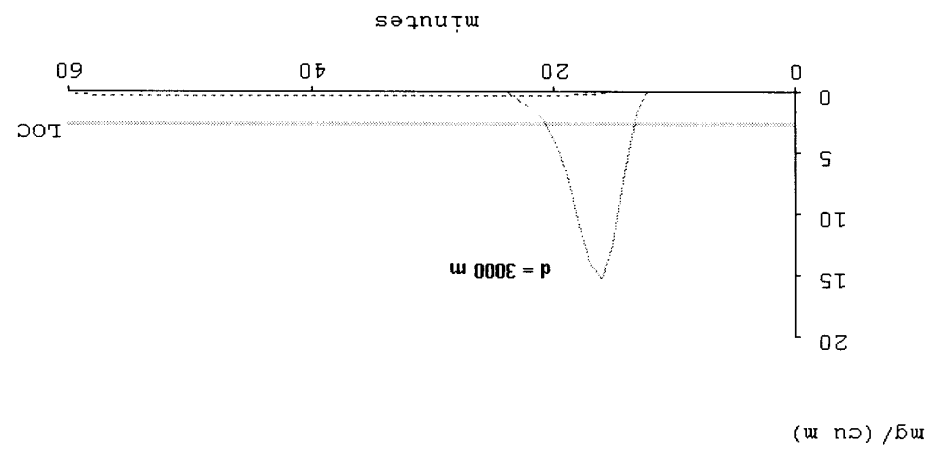
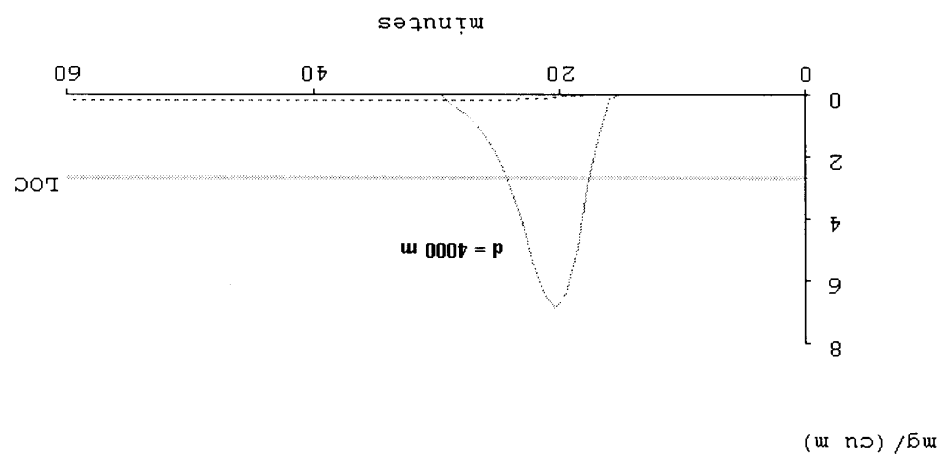
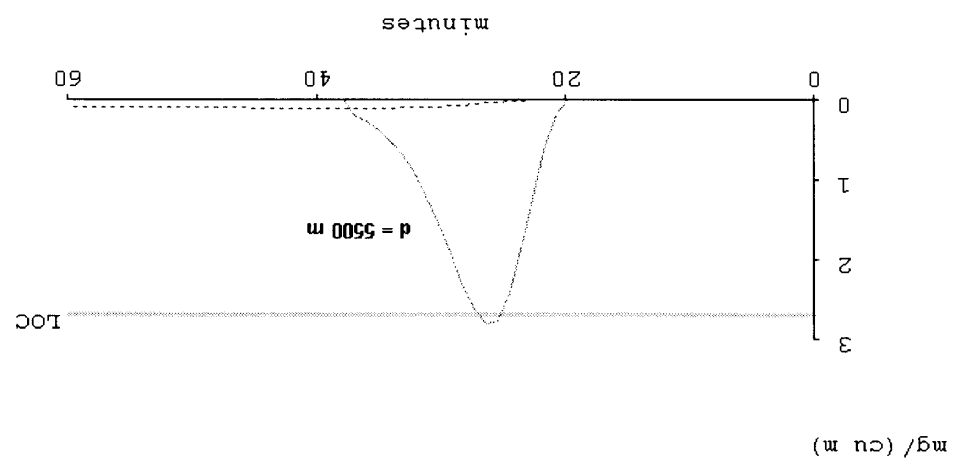
De nuevo, la concentración LOC indicada en la figura 8.1.14 y en la tabla 8.1.10 es la concentración mínima de referencia utilizada para la determinación del tiempo de paso de la nube por cada enclave (2.7 mg/m³).

Las líneas punteadas representadas próximas a las abscisas de la figura 8.1.14 son los probables perfiles concentración-tiempo en el interior de edificaciones situadas en los diferentes enclaves evaluados.

TABLA 8.1.11. Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente HCl-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes (estabilidad D y 2,5 m/s de velocidad de viento).

Distancia (m)	$c_{m\acute{a}xima}$ (mg/m ³)	t_p (minutos)
1000	249	4.6
2000	46	6.5
3000	15.3	7.3
4000	6.9	6.9
5000	2.7	6.9

Figura 8.1.14. Perfiles concentración - tiempo de las nubes a 1000, 3000, 4000 y 5500 m del origen del accidente HCl-2 para las condiciones atmosféricas más frecuentes (Estabilidad D y 2,5 m/s de velocidad de viento).



En la figura 8.1.15 se representan las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube de la tabla 8.1.11, conjuntamente con los índices AEGL-1 y AEGL-2 –ver tabla 8.1.1–.

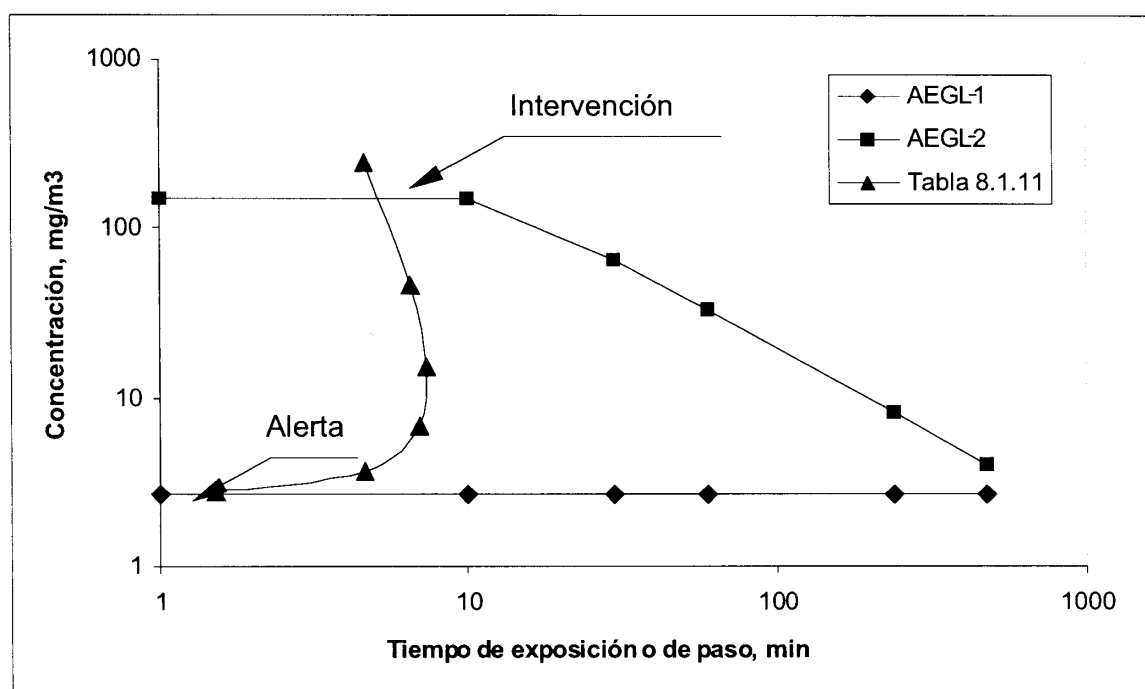


Figura 8.1.15. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube del escenario HCl-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes, conjuntamente con los índices AEGL-1 y AEGL-2.

Los puntos de corte de ambas representaciones establecen las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (AEGL-2) y alerta (AEGL-1) para este accidente. Dichas concentraciones máximas se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

Datos del limite de Intervención:

- Concentración máxima: **150 mg/m³**.
- Tiempo de paso: **5 min.**
- Distancia desde el origen del accidente: **1300 m.**

Datos del limite de Alerta:

- Concentración máxima: **2.7 mg/m³**.
- Tiempo de paso: En este caso, la línea concentración máxima-tiempo y el AEGL-1 se cortarían en $t=0$, dado que este último índice permanece constante –valor techo– y es, a su vez, la concentración mínima de referencia para determinar el tiempo de paso de la nube.
- Distancia desde el origen del accidente: **5500 metros**

8.2. SUSTANCIA CON ERPG

Sustancia seleccionada: Amoníaco.

Nº CAS: 7664-41-7

Características peligrosas -MTAS-. El amoníaco es un gas incoloro, de olor picante y sofocante. El umbral de olor es aproximadamente de 5 ppm. A bajas concentraciones (hasta 25-30 ppm) es un irritante que afecta a los ojos y a las vías respiratorias. A mayores concentraciones produce quemaduras en ojos, nariz y garganta, dolor torácico y de cabeza, náuseas, tos y un aumento de la velocidad de respiración; y en exposiciones severas provoca irritación de los tejidos que puede dar origen a edema pulmonar y neumonía.

Figura 8.1.17. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de "posible afectación", (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA.

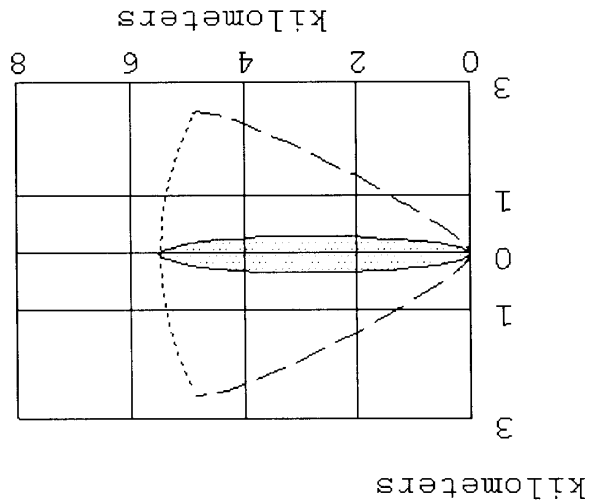
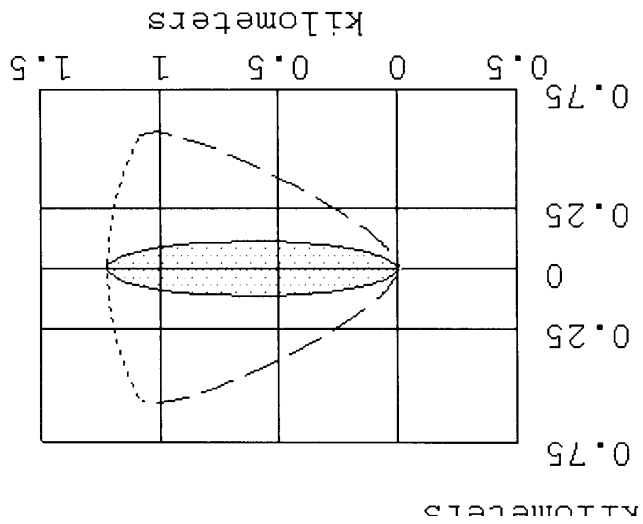
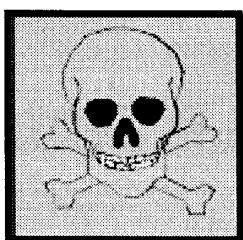


Figura 8.1.16. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de "posible afectación", (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA.

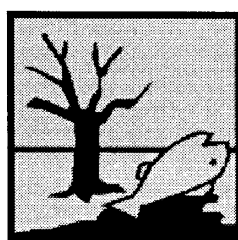


La ingestión causa efectos corrosivos en boca, esófago y estómago. El contacto con amoníaco anhidro líquido produce quemaduras de segundo grado, siendo especialmente peligroso cuando afecta a los ojos, dado que en pocos segundos (de 5 a 10) provoca severos daños, por lo que debe procederse al lavado inmediato, durante más de diez minutos y requerir asistencia medica urgente.

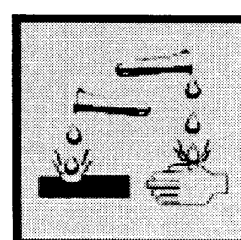
Etiquetas de clasificación como sustancia peligrosa:



T



N



C

R 10: inflamable.

R 23: tóxico por inhalación.

R 34: provoca quemaduras.

R 50: muy tóxico para los organismos acuáticos

El amoniaco está clasificado como sustancia tóxica, inflamable y peligrosa para el medio ambiente en el Reglamento sobre Notificación de Sustancias Nuevas y Clasificación, Envasado y Etiquetado de Sustancias Peligrosas –R.D. 363/1995– y según el Real Decreto 1254/1999 su categoría de peligro principal es la de tóxico.

Los valores del índice ERPG del amoniaco se indican en la tabla 8.2.1.

TABLA 8.2.1. Valores del ERPG para el amoniaco

Nivel	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3
Concentración, mg/m ³	18	106	530

Tal y como se indicó en el capítulo 5, para tiempos mayores a 60 minutos los ERPG se extrapolan siguiendo la ley de Haber, y para tiempos menores al citado se mantienen los correspondientes ERPGs como valores techo (ver tabla 8.2.2 y figura 8.2.1).

TABLA 8.2.2. Extrapolación de los ERPGs 1 y 2 del amoniaco

Tiempo de exposición	Extrapolación ERPG-1	Extrapolación ERPG-2
≤ 60 min.	18	106
>60 min	60	60

Una planta de producción de fertilizante complejo (NPK) dispone de una unidad de granulación que se alimenta de amoníaco gaseoso a través de una tubería posteriormente descrita. Debido a la realización de obras de remodelación en la instalación, una excavadora que operaba en una unidad adyacente rompió accidentalmente la mencionada tubería provocando la liberación de su contenido. Se estima que la actuación de la válvula de exceso de flujo limita a un minuto el tiempo de fuga.

En la tabla 8.2.3 se indican los datos de entrada al programa ALOHA para calcular el caudal de fuga.

Escenario accidental supuesto:

8.2.1. Escenario NH₃. Fuga instantánea de amoníaco.

Se ha tomado la concentración de 2.2 mg/m³ para determinar los tiempos de paso de la nube en los enlaces considerados, que corresponde a la octava parte del ERPG-1 del amoníaco.

Observaciones:

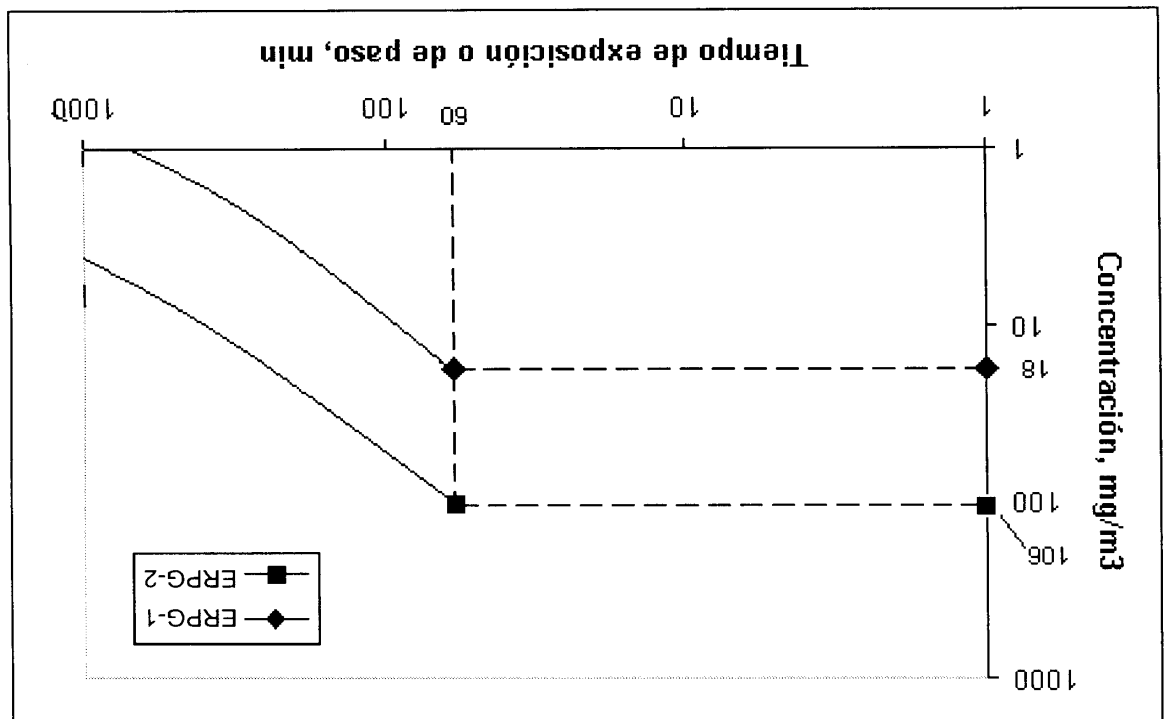


TABLA 8.2.3. Datos de la tubería necesarios para el cálculo de la fuga

LOCALIZACIÓN:	Ubicación X, 5 de julio, 1:00 h
INFORMACIÓN DE LA SUSTANCIA: (Disponible en la base de datos del programa).	
Nombre:	Amoniaco
Peso molecular	17.03 kg/kmol
Punto de ebullición	-33.43 °C
Concentración mínima de referencia (LOC)	2.2 mg/m ³
INFORMACIÓN ATMOSFÉRICA: (No influye sobre el cálculo de la fuga)	
Viento	2 m/s a 10 m de altura y dirección N
Estabilidad Pasquill	F
Temperatura	20 °C
Humedad relativa	50 %
Rugosidad del terreno	Campo abierto
Cobertura solar	0/10
DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA FUGA:	
Diámetro de la tubería	15cm
Longitud	40 m
Temperatura de la tubería	20°C
Presión de la tubería	2.10 ⁵ Pa
Tipo de tubería	Lisa
Área de fuga	177 cm ²
Tubería conectada a una <i>fuentes de elevada capacidad</i> (definida en el programa como "fuente infinita")	

Resultados de la simulación de la emisión:

Caudal medio durante el periodo de fuga: **199 kg/min.**

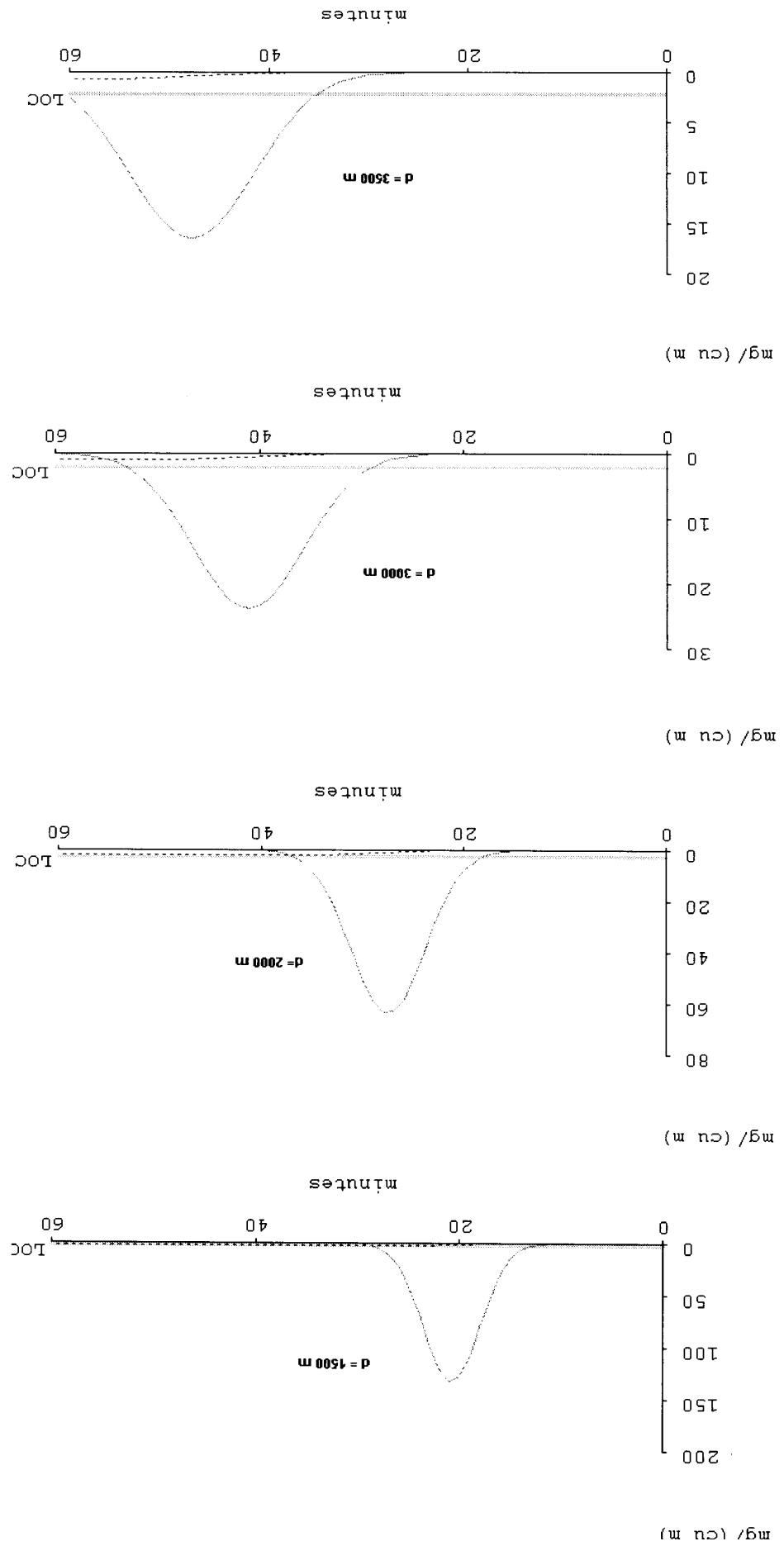
8.2.1.1. Escenario NH3-1. Dispersión de una nube instantánea en las condiciones atmosféricas más desfavorables

En la tabla 8.2.4 se indican los datos de entrada al módulo de dispersión del programa ALOHA. La información sobre la sustancia y las condiciones atmosféricas son las indicadas en la tabla 8.2.3.

TABLA 8.2.4. Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión

DATOS DE LA FUGA INSTANTÁNEA:	
Caudal de fuga	3.32 kg/s
Altura de la fuga	0 m
Cantidad total fugada	199 kg
OPCIONES DE VISUALIZACIÓN	

Figura 8.2.2. Perfiles concentración - tiempo de la nube a 1500, 2000, 3000 y 3500 m del origen del accidente NH₃-1 para las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento).



En la figura 8.2.2 se representan los perfiles de la nube a 1500, 2000, 3000 y 3500 metros del origen del accidente en la dirección del viento y en la tabla 8.2.5 se detallan las concentraciones máximas y tiempos de paso para estas distancias. Puede observarse:

1. Como corresponde a una fuga de corta duración, los perfiles tienen forma gaussiana. Conforme la nube se aleja del origen del accidente, la base del perfil se ensancha y su altura disminuye.
2. En este caso, los tiempos de paso de la nube se incrementan a medida que se aleja del origen del accidente como consecuencia de la dispersión.

La concentración LOC indicada en las tablas 8.2.3 y 8.2.4 y la figura 8.2.2 (2.2 mg/m^3) corresponde a la concentración mínima de referencia utilizada para determinar los tiempos de paso de la nube por cada enclave.

Las líneas punteadas próximas a las abscisas de la figura 8.2.2 son probables perfiles concentración-tiempo en el interior de edificaciones situadas en los diferentes enclaves evaluados.

TABLA 8.2.5. Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente NH₃-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)

Distancia (metros)	$c_{\text{máxima}}$ (mg/m^3)	t_p (minutos)
1500	132	15.4
2000	63.3	18.5
3000	23.7	23.8
3500	16.5	25.4

Siguiendo la secuencia propuesta, en la figura 8.2.3 se representan las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube de la tabla 8.2.5, conjuntamente con los valores extrapolados de los índices ERPG-1 y ERPG-2 –ver tabla 8.2.1–. Los puntos de corte establecen las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (ERPG-2) y alerta (ERPG-1). Dichas concentraciones máximas se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

Datos del límite de Intervención:

- Concentración máxima: **106 mg/m^3**
- Tiempo de paso de la nube: **17 minutos.**
- Distancia desde el origen del accidente: **1600 metros.**

Datos del límite de Alerta :

- Concentración máxima: **18 mg/m^3**
- Tiempo de paso de la nube: **25 minutos**

Las figuras 8.2.4 y 8.2.5 muestran las extensiones superficiales de la nube a nivel de suelo limitadas por las concentraciones máximas de interés (en este caso 106 y 18 mg/m³) junto con zonas de "posible afectación" (líneas discontinuas).

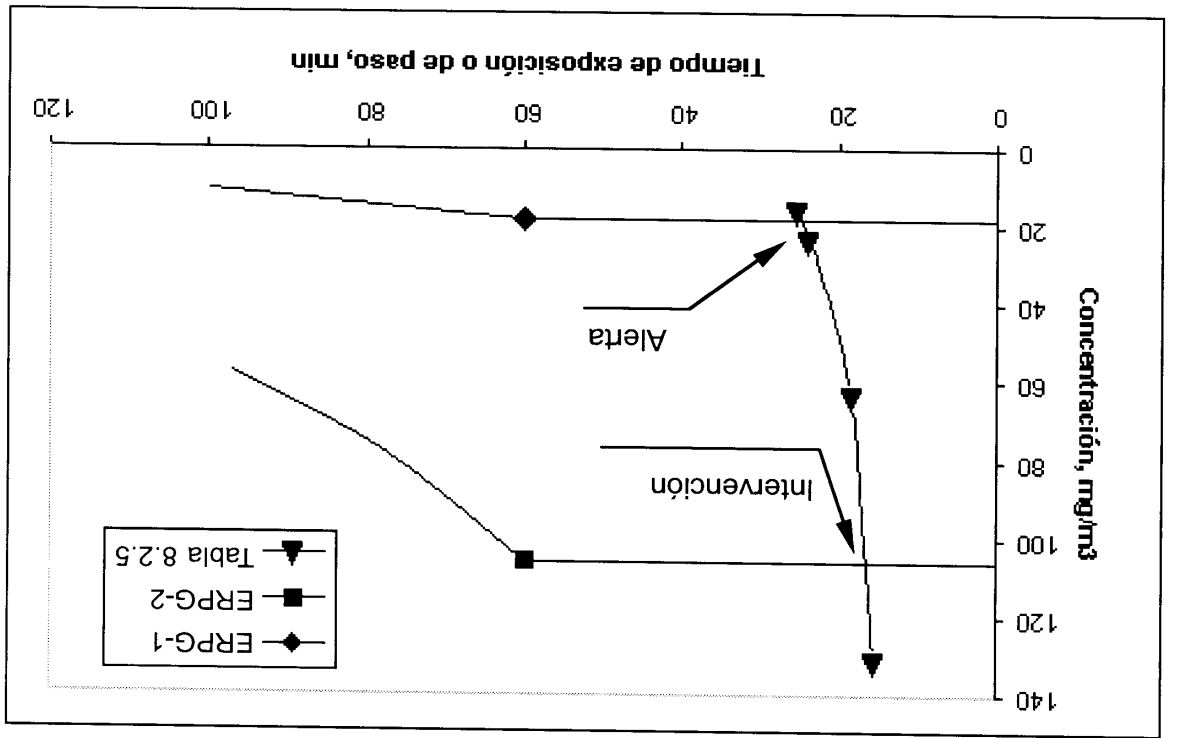


Figura 8.2.3. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso y de exposición de la nube del escenario NH₃-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables, conjuntamente con la extrapolación de los índices ERPGs niveles 1 y 2.

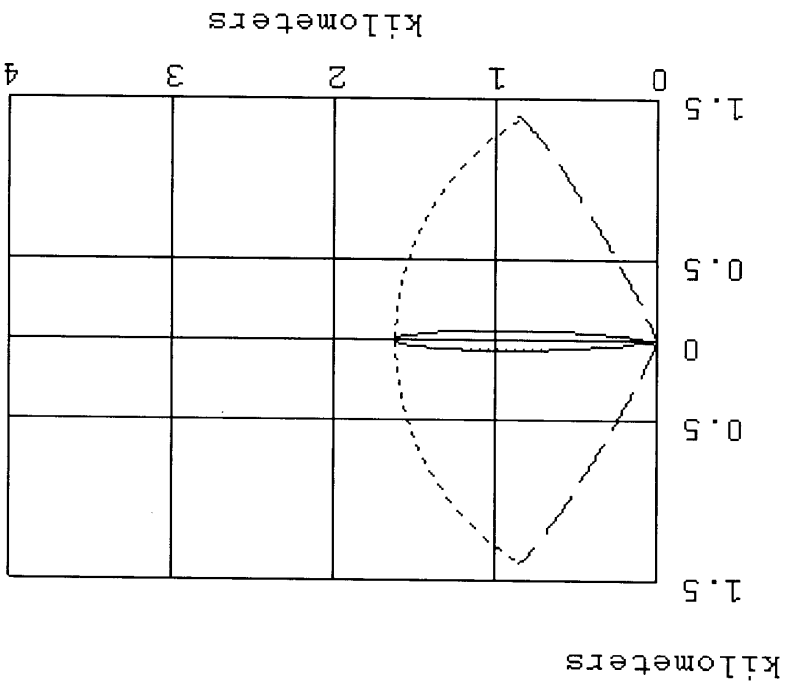


Figura 8.2.4. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de "posible afectación", (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA.

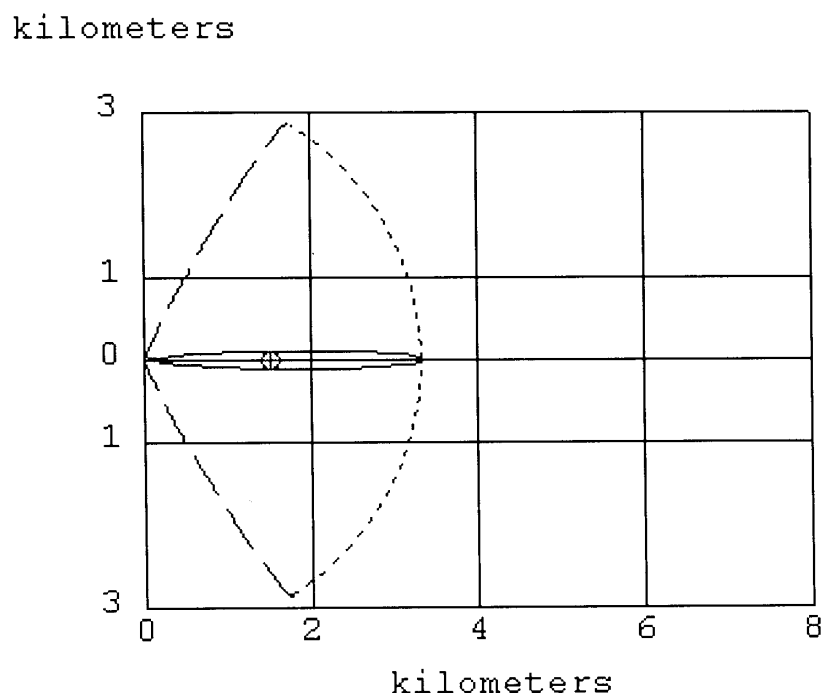


Figura 8.2.5. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de "posible afectación", (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA.

8.2.1.2 Escenario NH3-2. Dispersión de una nube instantánea en las condiciones atmosféricas más frecuentes

En la tabla 8.2.6 se indican los datos de entrada al módulo de dispersión del programa ALOHA. La información sobre la sustancia es la indicada en la tabla 8.2.3.

TABLA 8.2.6. Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión

INFORMACIÓN ATMOSFÉRICA:	
Viento	2.5 m/s a 10 m de altura y dirección N
Estabilidad	D
Temperatura	20 °C
Humedad relativa	50%
Rugosidad del terreno	Campo abierto
Cobertura solar	10/10
DATOS DE LA FUGA INSTANTÁNEA:	
Caudal de fuga	3.32 kg/s
Altura de la fuga	0 m
Cantidad total fugada	199kg
OPCIONES DE VISUALIZACIÓN:	

En la figura 8.2.7 se han representado algunos perfiles concentración-tiempo de la nube, concretamente a 1000, 1500, 2000 y 3000 metros del origen del accidente en la dirección del viento y en la tabla 8.2.7 se detallan las concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube para todas las distancias evaluadas. Puede observarse:

1. Como corresponde a una fuga de corta duración, los perfiles tienen forma gaussiana. Los tiempos de paso de la nube se incrementan a medida que la nube se aleja del origen del accidente hasta que alcanza 2000 m, pero a partir de dicha distancia disminuyen.

La concentración LOC indicada en las tabla 8.2.6 y en la figura 8.2.6 (2.2 mg/m³) corresponde a la concentración mínima de referencia utilizada para determinar los tiempos de paso de la nube por cada enclave.

Las líneas puntuadas representadas en la figura 8.2.6 son probables perfiles concentración-tiempo en el interior de edificaciones situadas en los diferentes enclaves evaluados.

TABLA 8.2.7. Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente NH3-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes (estabilidad D y 2.5 m/s de velocidad de viento)

Distancia (m)	$c^{máxima}$ (mg/m ³)	t_p (minutos)
800	143	4.6
1000	78.3	5.4
1500	26.5	6.9
2000	12.2	7.7
3000	4.21	7.3

En la figura 8.2.7 se representan las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube de la tabla 8.2.7, conjuntamente con los valores extrapolados de los índices ERPG-1 y ERPG-2 -ver tabla 8.2.1-. Los puntos de corte de ambas representaciones establecen las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (ERPG-2) y alerta (ERPG-1). Dichas concentraciones se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

Datos del límite de Intervención:

- Concentración máxima: 106 mg/m³
- Tiempo de paso de la nube: 5 minutos.
- Distancia desde el origen del accidente: 894 metros.

Datos del límite Alerta:

- Concentración máxima: 18 mg/m³
- Tiempo de paso de la nube: 7 minutos.
- Distancia desde el origen del accidente: 1700 metros.

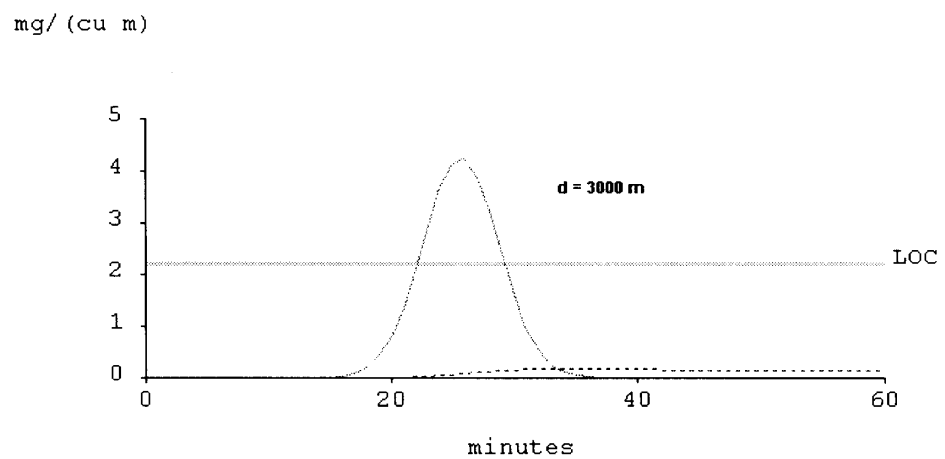
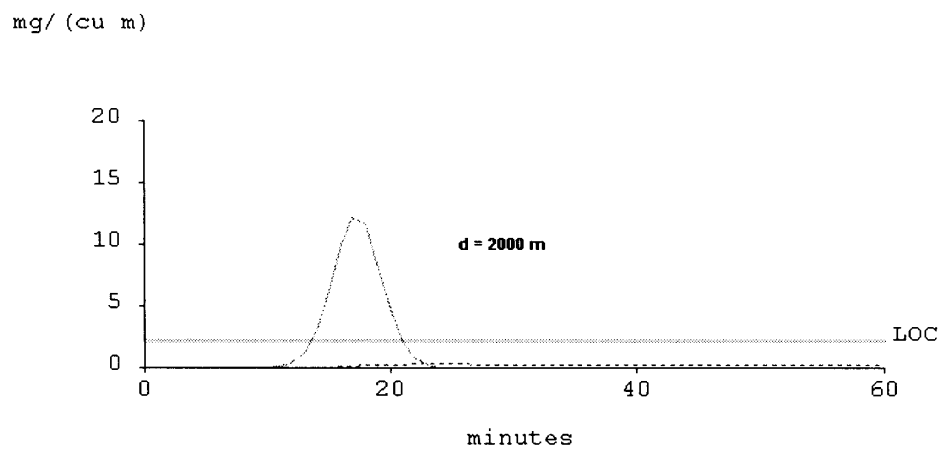
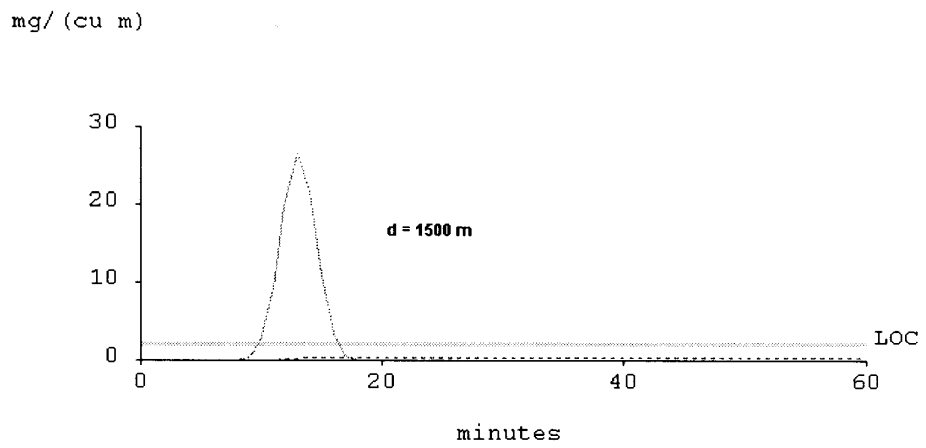
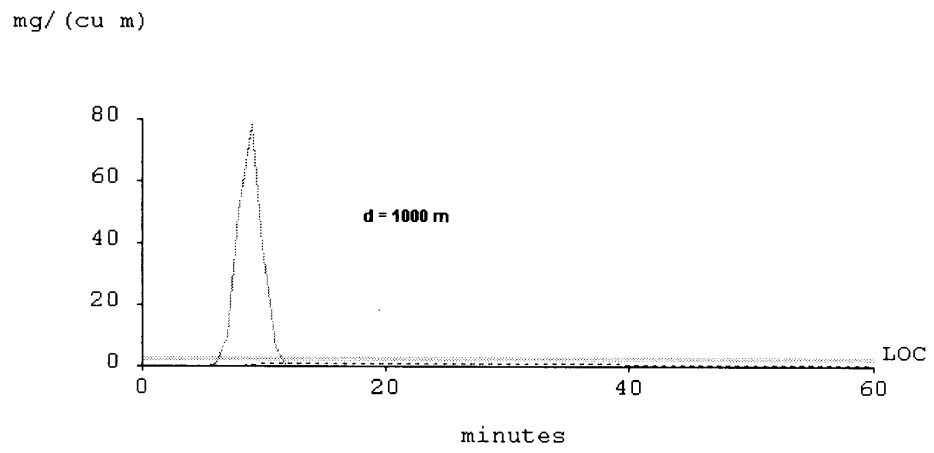
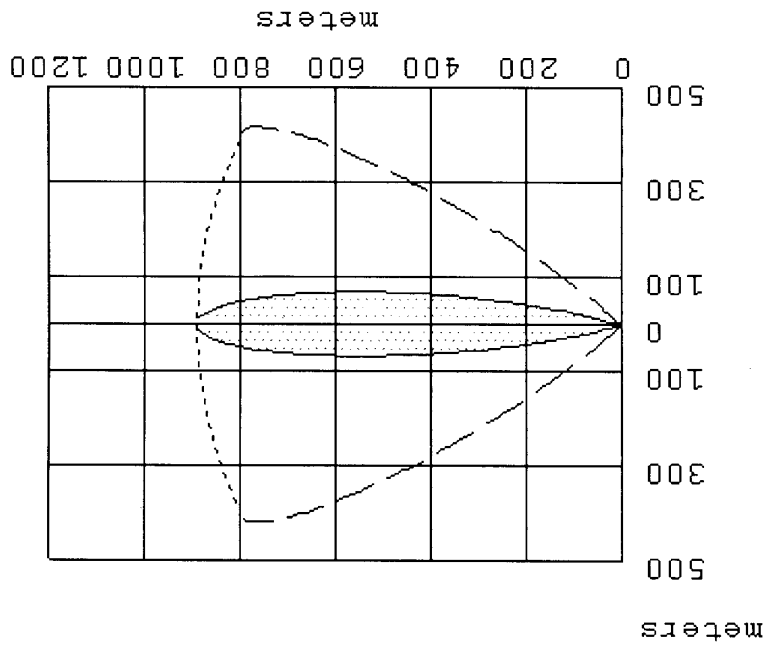
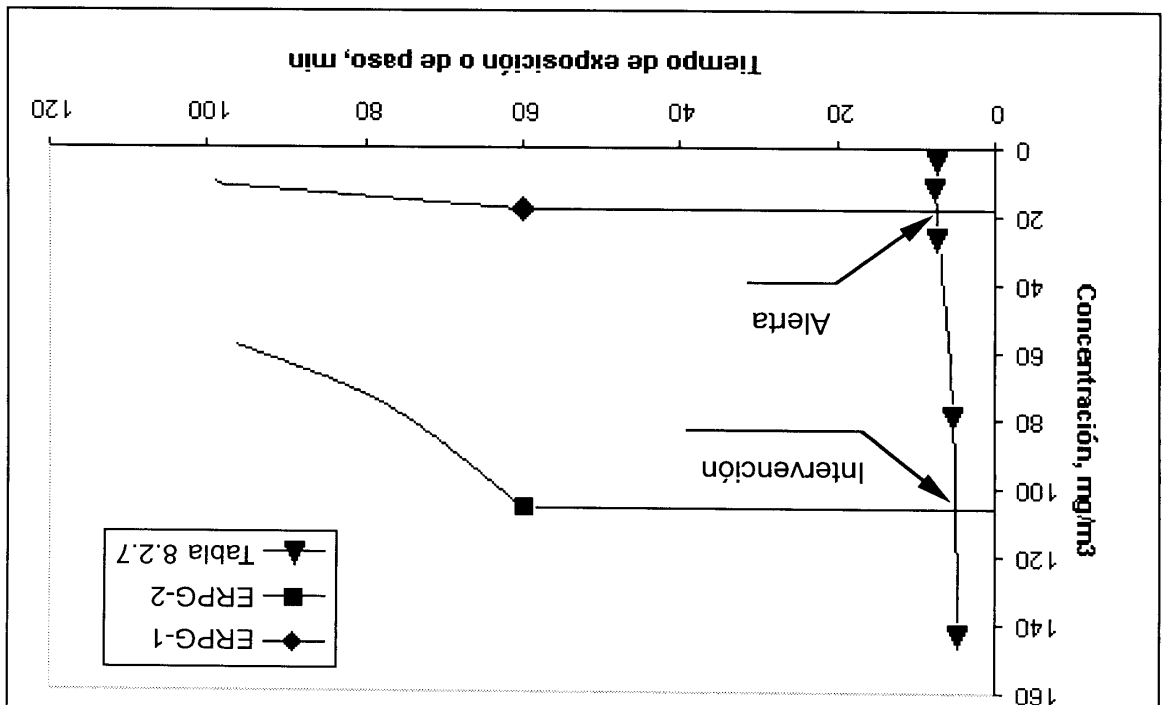


Figura 8.2.8. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de "posible afectación" (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.



Las figuras 8.2.8 y 8.2.9 muestran las extensiones superficiales de la nube a nivel de suelo limitadas por las concentraciones máximas de interés (en este caso 106 y 18 mg/m³) tanto con zonas de "posible afectación" (líneas discontinuas).

Figura 8.2.7. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube del escenario H3-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes conjuntamente con la extrapolación de los índices ERPG-1 y ERPG-2.



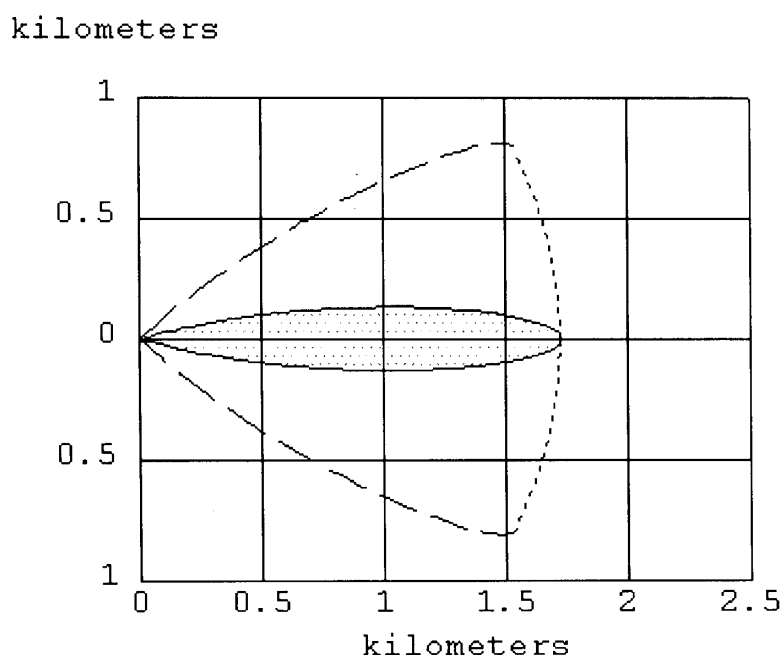


Figura 8.2.9. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de "posible afectación" (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.

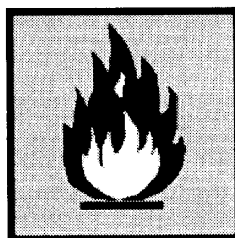
8.3. SUSTANCIA CON TEEL

Sustancia seleccionada: 2-metil-1,3-butadieno (Isopreno)

Nº CAS: 78-79-5

Características peligrosas –MTAS–. Líquido incoloro de olor característico muy volátil y extremadamente inflamable. Sus vapores son más densos que el aire, por lo que las emisiones se desplazan a nivel del suelo, donde los puntos de ignición son más fáciles de encontrar y la difusión está más limitada. La exposición por inhalación provoca sensación de quemazón, tos, mareo, respiración dificultosa, náuseas, sensación de ahogo y dolor de garganta. Sobre la piel y los ojos provoca dolor y enrojecimiento y por ingestión produce dolor abdominal y sensación de ardor. Es un posible cancerígeno.

Etiquetas de clasificación como sustancia peligrosa:



F+

El isopreno está categorizado como sustancia extremadamente inflamable según la Parte 2 del Anexo I del Real Decreto 1254/1999. –R.D. 1254/1999–.

Los valores del índice TEEL del isopreno se indican en la tabla 8.3.1.

TABLA 8.3.1. Valores del índice TEEL para el isopreno.

Nivel	TEEL-0	TEEL-1	TEEL-2	TEEL-3
Concentración, mg/m ³	125	400	600	75000

Tal y como se indicó en el capítulo 5, para tiempos mayores a 15 minutos los TEELs se extrapolan siguiendo la ley de Haber, y para tiempos menores al citado se mantienen los correspondientes TEELs como valores techo (ver tabla 8.3.2 y figura 8.3.1).

TABLA 8.3.2. Extrapolación de los TEELs 1 y 2 del isopreno

Tiempos de exposición	Extrapolación TEEL-1	Extrapolación TEEL-2
0 a 15 min	400	600
15 a 60 min	$400 \cdot \frac{5}{t_{\text{paso}}}$	$600 \cdot \frac{5}{t_{\text{paso}}}$

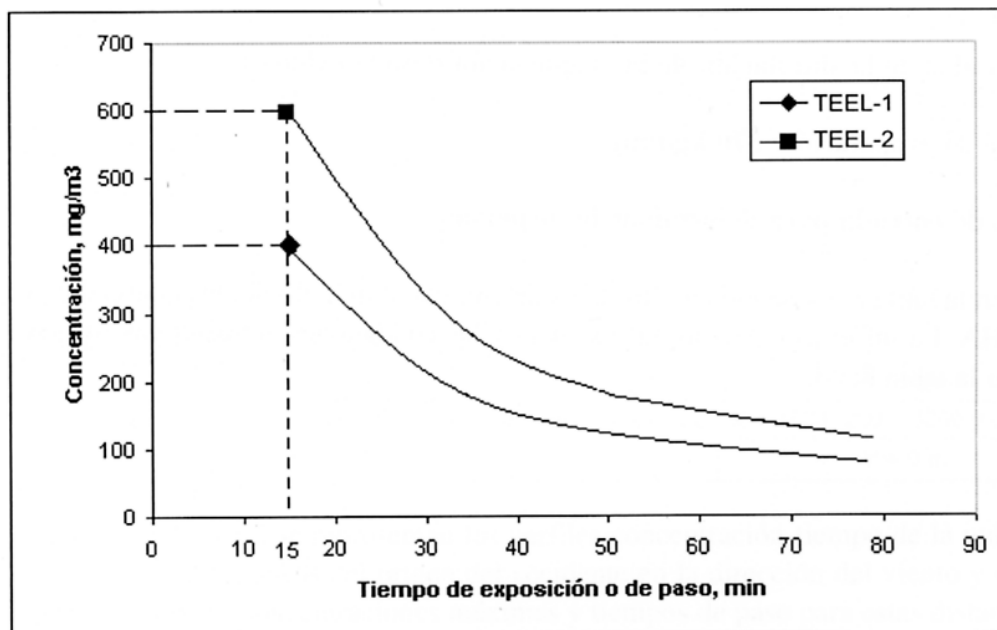


Figura 8.3.1. Extrapolación del TEEL-1 y TEEL-2 del isopreno.

Observación:

Se ha tomado la concentración de 12.5 mg/m³ para determinar los tiempos de paso de la nube en los enclaves considerados, que corresponde a 1/32 veces el TEEL-1 del isopreno.

8.3.1 Escenario IP. Fuga continua de isopreno

Escenario accidental supuesto:

Una planta de producción de caucho sintético por polimerización catalizada en disolución utiliza isopreno como materia de partida. Se supone que como consecuencia de la corrosión de un tanque de almacenamiento de 150 m³, que se encuentra al 20 % de capacidad, sufre una rotura por su parte inferior, derramándose la totalidad de su contenido y dando lugar a un charco de 40 m de diámetro. El producto se evapora y se dispersa en la atmósfera. Se estima que el derrame puede ser detectado, controlado con una capa de espuma y recogido por bombeo, en otro depósito cercano en un tiempo total de 20 minutos.

La evaporación del producto derramado depende de las condiciones atmosféricas reinantes, por lo que será necesario calcular el caudal de evaporación en las dos condiciones atmosféricas consideradas.

8.3.1.1. Escenario IP-1. Evaporación desde un charco y dispersión en las condiciones atmosféricas más desfavorables

En la tabla 8.3.3 se indican los datos de entrada al programa ALOHA para simular la evaporación desde un charco de dimensiones conocidas a fin de conocer el caudal de evaporación de la sustancia.

Resultados de la simulación de la evaporación desde el charco:

Caudal de evaporación: **570 kg/min.**

Datos de entrada para determinar la dispersión:

En la tabla 8.3.4 se indican los datos de entrada al módulo de dispersión del programa ALOHA. La información sobre la sustancia y las condiciones atmosféricas son las indicadas en la tabla 8.3.3.

TABLA 8.3.3. Datos del charco necesarios para el cálculo de la evaporación

LOCALIZACIÓN:	Ubicación X, 15 de julio, 5:00 h
INFORMACIÓN DE LA SUSTANCIA: (Disponible en la base de datos del programa).	
Nombre	Isopreno
Peso molecular	68.12 kg/kmol
Punto de ebullición	34.05°C
Presión de vapor a la temperatura ambiente	0.6 atm
Concentración mínima de referencia (LOC)	12.5 mg/m ³
INFORMACIÓN ATMOSFÉRICA:	
Viento	2 m/s a 10 m de altura y dirección N
Estabilidad	F
Temperatura	20 °C
Humedad relativa	50%
Rugosidad del terreno	Campo abierto
Cobertura solar	0/10
DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA FUGA: evaporación desde un charco	
Diámetro del charco	40 m
Masa del charco	20.400 kg
Tipo de suelo	Hormigón
Temperatura del suelo	20°C
Temperatura inicial del charco	20°C

TABLA 8.3.4. Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión

DATOS DE LA FUGA:	
Caudal de fuga	570 kg/min
Altura de la fuga	0 m
Duración	20 min.
Cantidad total fugada	11400 kg
OPCIONES DE VISUALIZACIÓN	
LOC	12.5mg/m ³
Coordenadas para determinar los perfiles concentración-tiempo	X = 1500, 2000, 3000 y 3200 m. Y = 0 m

En la figura 8.3.2 se representan los perfiles concentración-tiempo de la nube a 1500, 2000, 3000 y 3200 metros del origen del accidente en la dirección del viento y en la tabla 8.3.5 se detallan las concentraciones máximas y tiempos de paso para estas distancias. Puede observarse:

1. Los perfiles tienen inicialmente forma de “meseta”, pero a medida que aumenta la distancia al origen del accidente, se aproximan a morfologías de tipo gaussiano.
2. Los tiempos de paso de la nube no presentan variación significativa a las distancias evaluadas.

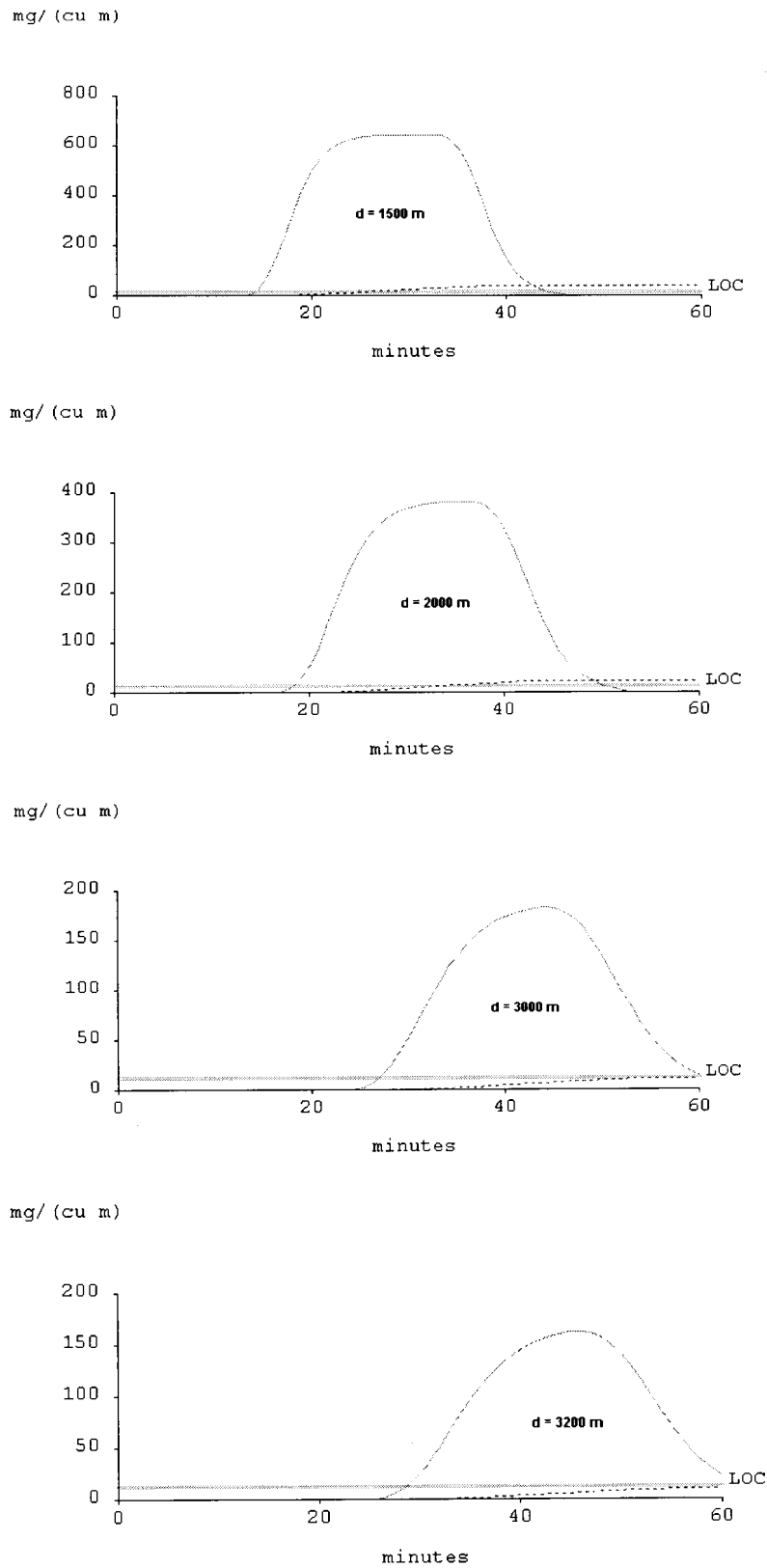


Figura 8.3.2. Perfiles concentración - tiempo de la nube a 1500, 2000, 3000 y 3200 m del origen del accidente IP-1 para las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento).

La concentración LOC indicada en las tablas 8.3.3 y 8.3.4 y en la figura 8.3.2 (1 mg/m³) corresponde a la concentración mínima de referencia utilizada para determinar el tiempo de paso de la nube por cada enclave.

Las líneas punteadas próximas a las abscisas de la figura 8.3.2 son probables perfiles de concentración-tiempo en el interior de edificaciones situadas en los diferentes enclaves evaluados.

TABLA 8.3.5. Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente IP-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)

Distancia (metros)	$c_{m\acute{a}xima}$ (mg/m ³)	t_p (minutos)
1500	643	28.1
2000	380	30.8
3000	182	33.1
3200	161	33.5

Siguiendo la secuencia propuesta, en la figura 8.3.3 se representan las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube de la tabla 8.3.5, conjuntamente con los valores extrapolados de los índices TEEL-1 y TEEL-2 –ver tabla 8.3.1–. Los puntos de corte de ambas representaciones establecen las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (TEEL-2) y alerta (TEEL-1). Dichas concentraciones se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

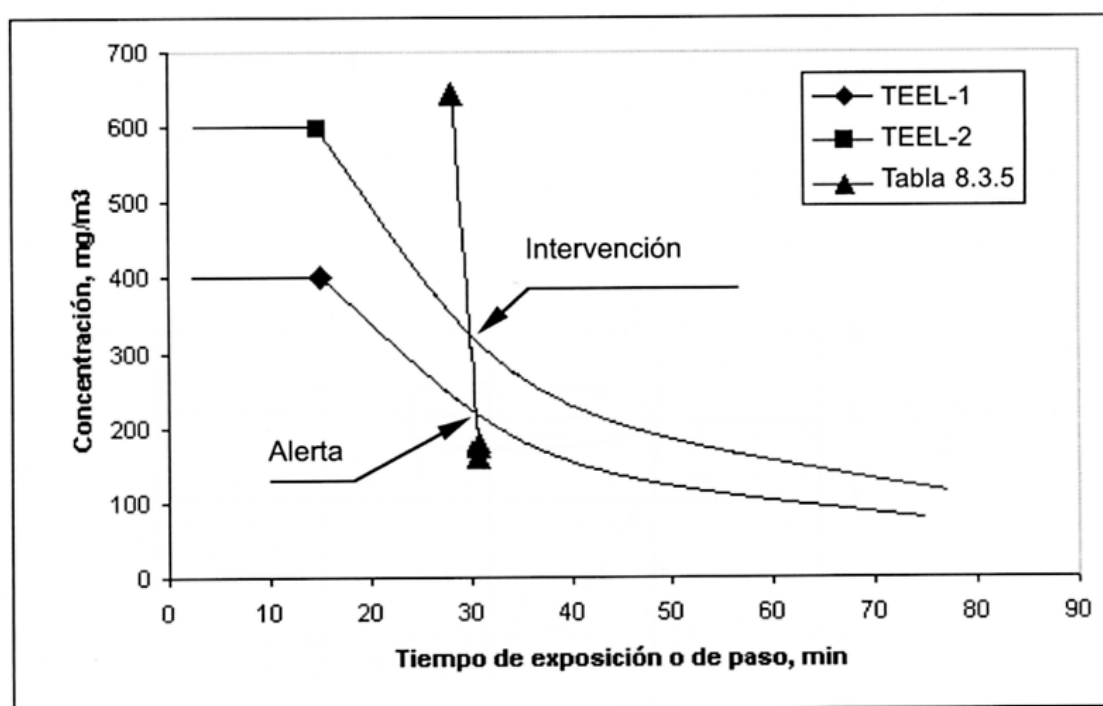


Figura 8.3.3. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube del escenario IP-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables conjuntamente con la extrapolación de los índices TEEL-1 y TEEL-2.

Datos del límite de Intervención:

- Concentración máxima: **285 mg/m³**
- Tiempo de paso de la nube: **32 minutos.**
- Distancia desde el origen del accidente: **2300 metros.**

kilometers

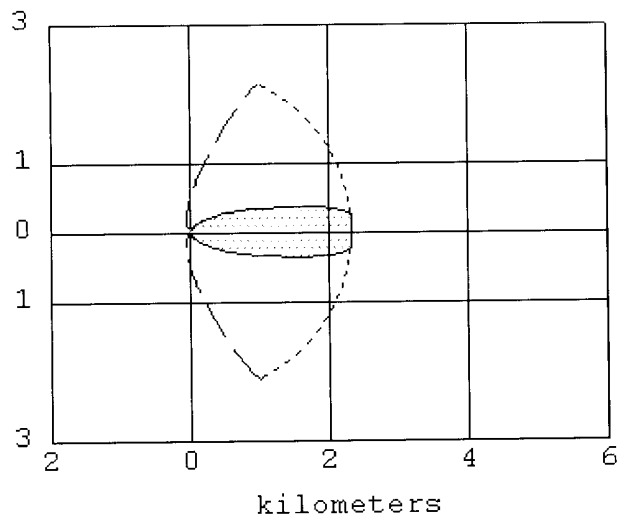


Figura 8.3.4. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de "posible afectación" (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.

kilometers

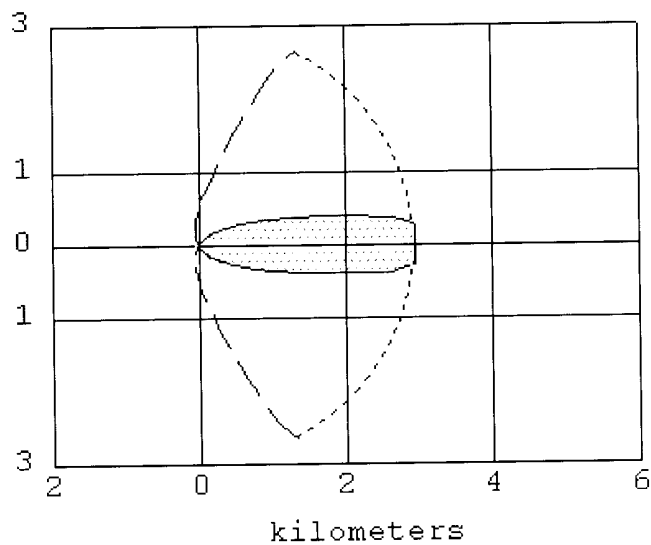


Figura 8.3.5. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de "posible afectación" (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.

Datos del límite de Alerta:

- Concentración máxima: **185 mg/m³**
- Tiempo de paso de la nube: **33 minutos.**
- Distancia desde el origen del accidente: **2900 metros.**

Las figuras 8.3.4 y 8.3.5 muestran las extensiones superficiales de la nube a nivel de suelo, limitadas por las concentraciones máximas de interés (en este caso 285 y 185 mg/m³) junto con zonas de “posible afectación” (líneas discontinuas).

8.3.1.2 Escenario IP-2. Evaporación desde un charco y dispersión en las condiciones atmosféricas más frecuentes

En la tabla 8.3.6 se indican los datos de entrada al programa ALOHA para simular la evaporación desde el charco de dimensiones conocidas a fin de conocer el caudal de evaporación del mismo.

TABLA 8.3.6. Datos del charco necesarios para el cálculo de la evaporación

LOCALIZACIÓN:	Ubicación X, 20 de mayo, 13:00 h
INFORMACIÓN DE LA SUSTANCIA: (Disponible en la base de datos del programa).	
Nombre	Isopreno
Peso molecular	68.12 kg/kmol
Punto de ebullición	34.05°C
Presión de vapor a la temperatura ambiente	0.6 atm
Concentración mínima de referencia (LOC)	12.5 mg/m ³
INFORMACIÓN ATMOSFÉRICA:	
Viento	2.5 m/s a 10 m de altura y dirección N
Estabilidad	D
Temperatura	20 °C
Humedad relativa	50%
Rugosidad del terreno	Campo abierto
Cobertura solar	10/10
DATOS PARA EL CÁLCULO DE LA FUGA: evaporación desde un charco	
Diámetro del charco	40 m
Masa del charco	20400 kg
Tipo de suelo	Hormigón
Temperatura del suelo	20°C
Temperatura inicial del charco	20°C

Resultados de la simulación de la evaporación desde el charco:

Caudal de evaporación: **691 kg/min.**

El caudal de evaporación es algo mayor que en el caso anterior, como consecuencia de la mayor velocidad del viento que favorece la transmisión de calor y de materia.

En la tabla 8.3.7 se indican los datos de entrada al módulo de dispersión del programa ALOHA. La información sobre la sustancia y las condiciones atmosféricas son las indicadas en la tabla 8.3.6.

TABLA 8.3.7. Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión

DATOS DE LA FUGA:	
Caudal de fuga	691 kg/min
Altura de la fuga	0 m
Duración	20 min
Cantidad total fugada	13820 kg
OPCIONES DE VISUALIZACIÓN	
LOC	12.5 mg/m ³
Coordenadas para determinar los perfiles concentración-tiempo	X = 1000, 2000, 3000, y 3500 m. Y = 0 m

En la figura 8.3.6 se representan algunos perfiles concentración-tiempo de la nube, concretamente a 1000, 2000, 3000 y 3500 metros del origen del accidente en la dirección del viento y en la tabla 8.3.8 se detallan las concentraciones máximas y tiempos de paso para todas las distancias evaluadas. Puede observarse:

1. Los perfiles tienen forma de “meseta”, manteniéndose así hasta 3000 metros del origen del accidente.
2. Los tiempos de paso de la nube permanecen casi constantes en los enclaves evaluados.

TABLA 8.3.8. Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente IP-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes (estabilidad D y 2.5 m/s de velocidad de viento)

Distancia (m)	$c_{m\acute{a}xima}$ (mg/m ³)	t_p (minutos)
1000	650	23
2000	208	25
2500	145	25.8
3000	108	26.2
3500	84.3	26.2

En la figura 8.3.7 se representan las concentraciones máximas y los tiempos de paso de la nube de la tabla 8.3.8, conjuntamente con los valores extrapolados de los índices TEEL-1 y TEEL-2 –ver tabla 8.3.1–. Los puntos de corte de ambas representaciones establecen las concentraciones máximas que delimitan las zonas de intervención (TEEL-2) y alerta (TEEL-1). Dichas concentraciones máximas se introducen en el programa ALOHA determinando las distancias de planificación, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

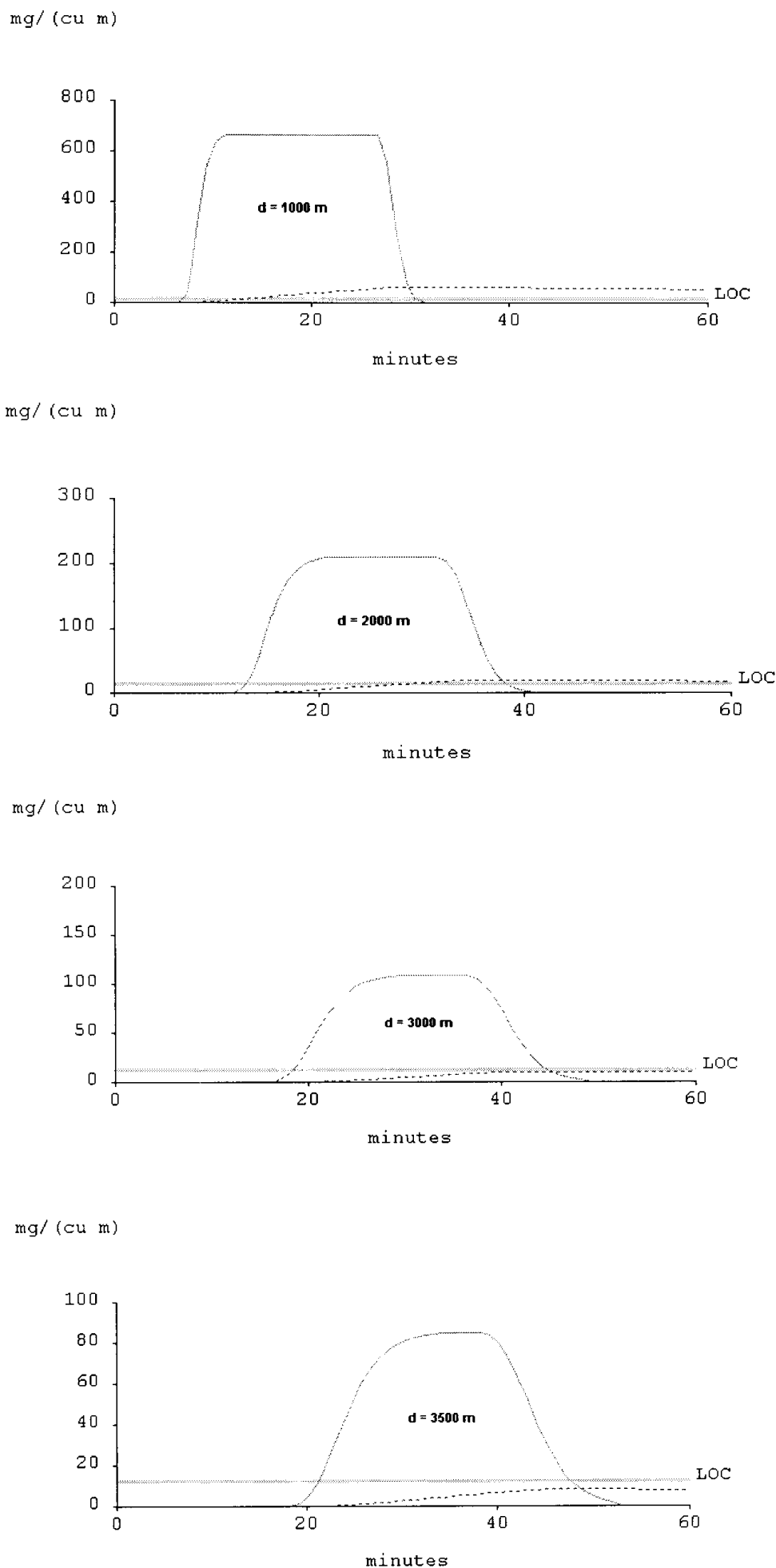


Figura 8.3.6. Perfiles concentración – tiempo de la nube a 1000, 2000, 3000 y 3500 m del origen del dente IP-1 para las condiciones atmosféricas más frecuentes. (estabilidad D y 2,5 m/s de velocidad de viento)

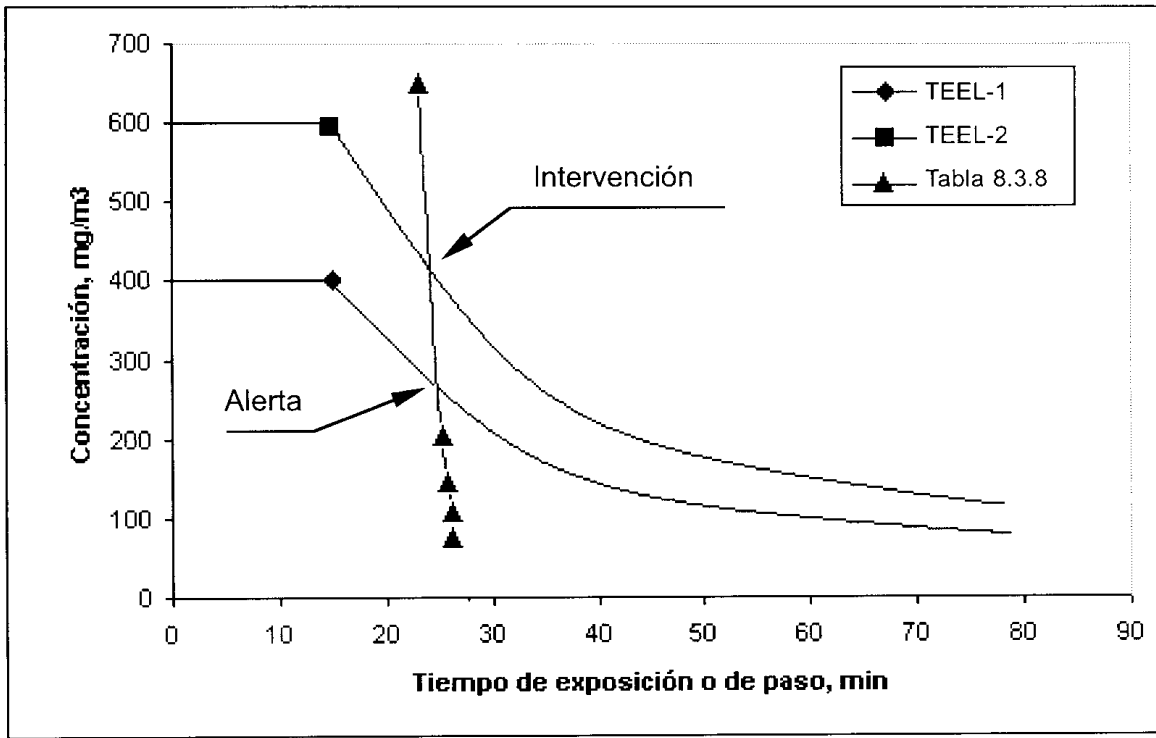


Figura 8.3.7. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube del escenario IP-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes conjuntamente con la extrapolación de los índices TEEL-1 y TEEL-2.

Datos del límite de Intervención:

- Concentración máxima: **360 mg/m³**
- Tiempo de paso de la nube: **25 minutos**.
- Distancia desde el origen del accidente: **1400 metros**.

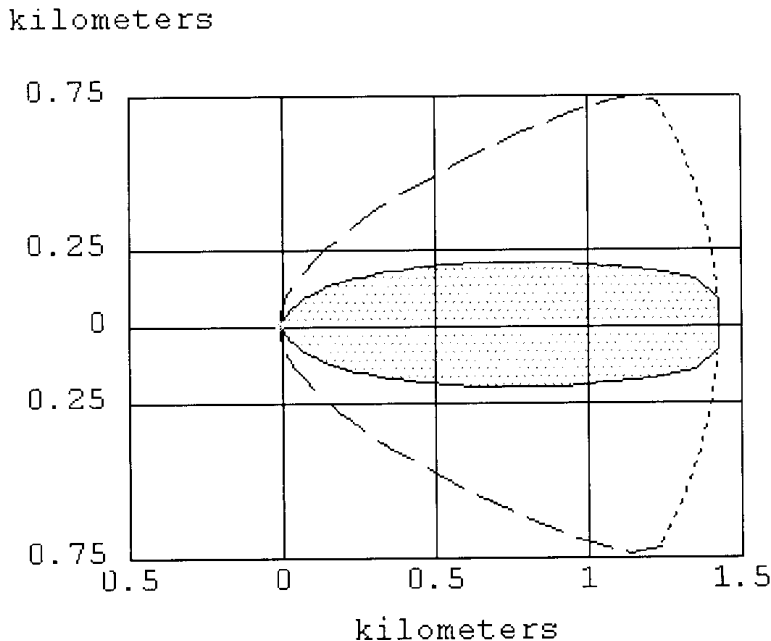


Figura 8.3.8. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de "posible afectación" (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.

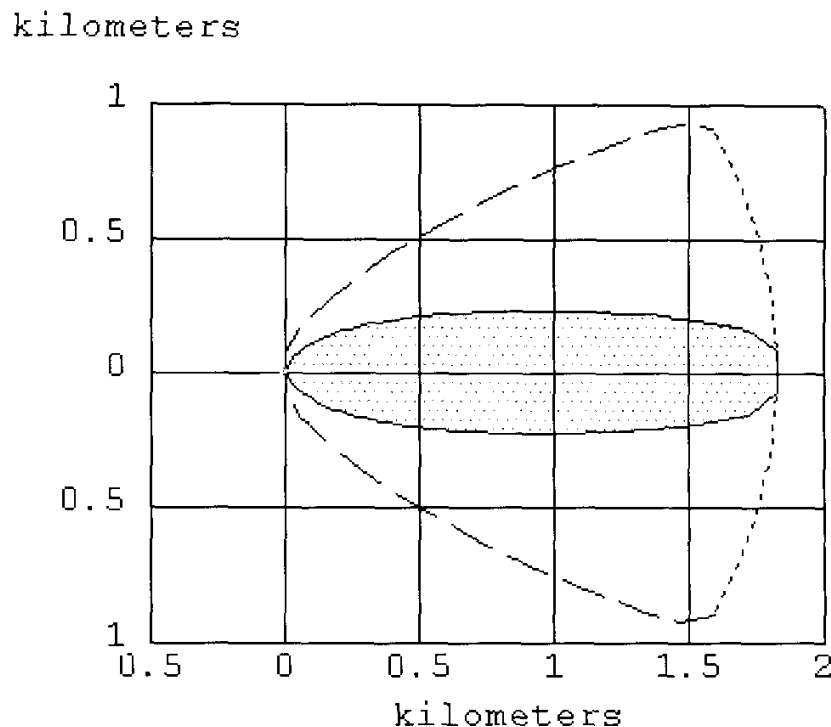


Figura 8.3.9. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA.

Datos del límite de Alerta:

- Concentración máxima: **240 mg/m³**
- Tiempo de paso de la nube: **25 minutos.**
- Distancia desde el origen del accidente: **1800 metros.**

Las figuras 8.3.8 y 8.3.9 muestran las extensiones superficiales de la nube a nivel de suelo limitadas por las concentraciones máximas de interés (en este caso 360 y 240 mg/m³ junto con zonas de “posible afectación” (líneas discontinuas).

8.4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MTAS: *Fichas Internacionales de Seguridad Química*. Ministerio de Trabajo y Asunto Sociales, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, <<http://www.mtas.es/insht/index.htm>>[Consulta: 10 de mayo de 2002].

R.D. 363/1995; *Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento sobre Notificación de Sustancias Nuevas y Clasificación, Envasado y Etiquetado de Sustancias Peligrosas*. (B.O.E. nº 133, de 5-06-95) y sus posteriores modificaciones.

R.D. 1254/1999; *Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas*. (B.O.E. nº 172, 20-7-99).

Valores de los índices AEGLs

Los valores de los índices AEGLs –*AEGL (2003)*– (referencia incluida en el capítulo 4) se recogen en el CD incorporado en el interior de la contraportada de esta Guía. La información está disponible en formato de Microsoft Excel con el fin de facilitar posibles actualizaciones, modificaciones, incorporación de nuevas sustancias,...

Para obtener los datos correspondientes a la sustancia de interés se recomienda buscar por el nombre de la sustancia o por su número CAS (Barra de herramientas > edición > buscar).

Estos valores se modifican y amplían con relativa frecuencia, por lo que los autores de esta Guía advierten sobre posibles cambios en futuras actualizaciones, no haciéndose responsables de la aceptación o utilización de los mismos ni de las consecuencias que de ello puedan derivarse.

Valores de los índices ERPGs y TEELs

Los valores de los índices ERPGs –*ERPG (2002)*– y TEELs –*TEEL (2002)*–, (referencias incluidas en el capítulo 4) se recogen en el CD incorporado en el interior de la contraportada de esta Guía. La información está disponible en formato de Microsoft Excel, con el fin de facilitar posibles actualizaciones, modificaciones, incorporación de nuevas sustancias,...

Para obtener los datos correspondientes a la sustancia de interés se recomienda buscar por el nombre de la sustancia o por su número CAS (Barra de herramientas > edición > buscar).

En este archivo se indica, en la última columna, si la sustancia dispone de valores del índice ERPG. Los valores de este índice (ERPG-1, ERPG-2 y ERPG-3) coinciden entonces con los correspondientes valores del TEEL (TEEL-1, TEEL-2 y TEEL-3).

Estos valores se modifican y amplían con relativa frecuencia, por lo que los autores de esta Guía advierten sobre posibles cambios en futuras actualizaciones, no haciéndose responsables de la aceptación o utilización de los mismos ni de las consecuencias que de ello puedan derivarse.

Nomenclatura

A:	Área, m^2
A_o :	Área de orificio, m^2
C:	Parámetro de difusión, m
C_D :	Coefficiente de descarga a través de orificio, adimensional
C_p :	Calor específico a presión constante, J/kg K
C_{pa} :	Calor específico a presión constante del aire, J/kg K
C_v :	Calor específico a volumen constante, J/kg K
C_x :	Parámetro de difusión en la dirección x, m
C_y :	Parámetro de difusión en la dirección y, m
C_z :	Parámetro de difusión en la dirección z, m
D:	Dosis, $(mg/m^3)^n s$ ó $ppm^n min$
F_R :	Fuerza de rozamiento, N
H:	Entalpía, J/kg
H_o :	Flujo vertical de calor, $J/m^2 s$
IRN:	Índice de radiación neta
K_m :	Coefficiente de transferencia de materia, m/s
K_r :	Viscosidad turbulenta o de remolino
L:	Longitud de Monin-Obukhov, m
M_a :	Masa molecular del aire, 29 kg/kmol
M_s :	Masa molecular de la sustancia, kg/kmol
P:	Presión, N/m^2
P_{atm} :	Presión atmosférica, N/m^2
P_{crit} :	Presión crítica, N/m^2
P_p :	Presión parcial, N/m^2
P_{ref} :	Presión en la altura de referencia, N/m^2
$P_{v(T)}$:	Presión de vapor a la temperatura T, N/m^2
Q:	Caudal volumétrico, m^3/s

Q_o : Caudal volumétrico de emisión, m^3/s
 R : Constante universal de los gases, $J/ kmol K$
 R_i : Número de Richardson de gradiente, dado por la ecuación 2.37
 R_{i_B} : Número de Richardson global, dado por la ecuación 2.38
 R_{i_M} : Número de Richardson modificado, dado por la ecuación 2.39
 S : Entropía, J/K
 T : Temperatura, K
 T_a : Temperatura del aire, K
 T_{crit} : Temperatura crítica
 T_l : Temperatura del líquido, K
 T_{ref} : Temperatura en el punto de referencia, K
 T_{sl} : Temperatura del suelo, K
 V : Volumen, m^3
 V_o : Volumen inicial fugado, m^3
 X : Distancia desde el origen de la fuga en la dirección del viento, m
 b_o : Parámetro de la forma de la nube
 c : Concentración, mg/m^3
 c_{max} : Concentración máxima en la dirección del viento, mg/m^3
 c_{max-x} : Concentración máxima para el nivel de daño x , ppm ó mg/m^3
 c_{med} : Concentración media o promediada en la dirección del viento, mg/m^3
 c_{minref}^* : Concentración mínima de referencia, ppm ó mg/m^3
 c_o : Concentración en la fuente, mg/m^3
 c_{son} : Velocidad del sonido
 dq : Calor intercambiado por el fluido con el exterior, J/kg
 dw : Trabajo mecánico intercambiado por el fluido con el exterior, J/kg
 dz : Variación de la altura geométrica, m
 g : Aceleración de la gravedad, m/s^2
 g_{eff} : Gravedad efectiva, m/s^2
 k : Índice de expansión adiabática, adimensional
 k^* : Coeficiente de difusión, m^2/s
 k_{sl} : Conductividad térmica del suelo, W/mK
 k_x : Coeficiente de difusión de una sustancia en aire en la dirección x , m^2/s
 k_y : Coeficiente de difusión de una sustancia en aire en la dirección y , m^2/s
 k_z : Coeficiente de difusión de una sustancia en aire en la dirección z , m^2/s
 l : Longitud de mezcla, m , ecuación 2.39
 m_l : Fracción másica de la fase líquida
 m_v : Fracción másica de la fase vapor

m_c :	Masa de contaminante emitido, kg
\dot{m} :	Caudal másico, kg/s
\dot{m}^* :	Caudal específico de líquido evaporado, kg/m ² s
\dot{m}_c :	Caudal másico del contaminante, kg/s ó mg/s
n :	Índice de difusión, ver ecuaciones 2.47, 2.48 y 2.49
q :	Flujo de calor transferido, J/m ² s
\dot{q}^* :	Caudal específico de calor transferido desde el entorno al fluido, J/m ² s
p :	Exponente de la expresión potencial de la velocidad del aire, según la tabla 2.2
\dot{m}_g :	Caudal másico del gas, kg/s
t :	Tiempo, s
t_d :	Tiempo de descarga, s
t_{exp} :	Tiempo de exposición, min. ó s
t_n :	Tiempo de paso total de la nube, min. ó s
t_p :	Tiempo de paso efectivo o tiempo de paso, min. ó s
t_r :	Tiempo de referencia de los índices de exposición min. ó s
u :	Velocidad, m/s
u_a :	Velocidad del aire normalmente medida a 10 m desde el suelo, m/s
u_{az} :	Velocidad del aire a la altura z , m/s
u_{azref} :	Velocidad del aire a la altura de referencia, m/s
u_* :	Velocidad de fricción, m/s
u_f :	Velocidad del fluido, m/s
u_x :	Velocidad del viento en la dirección x , m/s
u_y :	Velocidad del viento en la dirección y , m/s
u_z :	Velocidad del viento en la dirección z , m/s
x :	Coordenada en la dirección del viento, m
y :	Coordenada en la dirección transversal del viento, m
z :	Coordenada en la dirección vertical del viento, m
z :	Altura desde el suelo, m
\bar{z} :	Media geométrica de z_1 y z_2 (ver ecuación 2.38), m
z_1 :	Altura del nivel del líquido respecto al fondo del recipiente, m
z_o :	Longitud de rugosidad, m
z_o^* :	Altura del orificio respecto al fondo del recipiente, m
z_{ref} :	Altura de referencia desde el suelo, m
Δ :	Incremento
ΔH_{vap} :	Entalpía de vaporización, J/kg
$\Delta\rho$:	Diferencia de densidades entre la nube y el aire, kg/m ³
α :	Parámetro de ajuste en la ecuación 2.33

α_s :	Altura solar, grados sexagesimales
α_{sl} :	Difusividad térmica del suelo, m ² /s
γ :	Coeficiente de expansión isoentrópica, adimensional
δ :	Declinación solar, grados sexagesimales
θ :	Temperatura potencial, K
κ :	Constante de von Karman
ρ :	Densidad, kg/m ³
ρ_a :	Densidad del aire, kg/m ³
ρ_f :	Densidad del fluido, kg/m ³
ρ_l :	Densidad del líquido, kg/m ³
σ :	Desviación típica de la concentración, m
σ_x :	Desviación típica de la concentración en la dirección x, m
σ_y :	Desviación típica de la concentración en la dirección y, m
σ_z :	Desviación típica de la concentración en la dirección z, m
τ :	Esfuerzo cortante, N/m ²
ν :	Viscosidad cinemática del aire, m ² /s
ϕ :	Latitud geográfica del lugar, grados sexagesimales
ω :	Tiempo angular, grados sexagesimales
Γ :	Variación adiabática seca de temperatura del aire, +0.01 K/m

Terminología

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

AEGL: Acute Exposure Guideline Level.

AIHA: The American Industrial Hygiene Association.

ALOHA: Areal Locations of Hazardous Atmospheres.

CEEL: Community Emergency Exposure Levels.

CEGL: Continuous Exposure Guidance Level.

DOD: Department of Defense.

DOT: Department Of Transportation.

EEGL: Emergency Exposure Guidance Level.

EPA: Environmental Protection Agency.

ERPG: Emergency Response Planning Guidelines.

FEMA: Federal Emergency Management Agency.

IDLH: Immediately Dangerous to Life of Health.

IMET-TNO: Instituut voor Milieu - en Energietechnologie - Nederlandse Organisatie
Tolge/Ast Natuurwetenschappelijk Onder Zuek.

INERIS: Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.

IPVS: Inmediatamente Peligroso para la Vida y la Salud.

LC₅₀: Lethal Concentration - 50.

LC_{LO}: Lowest published Lethal Concentration.

LD₅₀: Lethal Dose 50.

LD_{LO}: Lowest published Lethal Dose.

LOC: Level of Concern.

MAK-TWA: Maximal Admissible Concentration/ Time-Weighted Average.

NAS: National Academy of Sciences.

NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health.

NRC-COT: National Research Council-Committee on Toxicology.

OCDE: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico.

PEL-C: Permissible Exposure Limit-Ceiling.

PEL-STEL: Permissible Exposure Limit Short-Term Exposure Limit.

PEL-TWA: Permissible Exposure Limit/Time Weighted Average.

REL-C: Recommended Exposure Limit- Ceiling.

REL-STEL: Recommended Exposure Limit -Short-Term Exposure Limit.

REL-TWA: Recommended Exposure Limit/ Time-Weighted Average.

SCAPA: Subcommittee on Consequence Assessment and Protective Actions.

TC_{LO}: Lowest published Toxic Concentration.

TD_{LO}: Lowest published Toxic Dose.

TEEL: Temporary Emergency Exposure Limit.

TLV-C: Threshold Limit Value - Ceiling.

TLV-STEL: Threshold Limit Value/Short-Term Exposure Limit.

TLV-TWA: Threshold Limit Value-Time-Weighted Average.

TNO: Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek.

VLA-EC: Valor Limite Ambiental-Exposición de Corta Duración.

VLA-ED: Valor Limite Ambiental-Exposición Diaria.

WEEL-C: Workplace Environmental Exposure Limit-Ceiling.

WEEL-STEL: Workplace Environmental Exposure Limit Short-Term Exposure Limit.

WEEL-TWA: Workplace Environmental Exposure Limit /Time-Weighted Average.

Índice de tablas

Tabla 2.1.	Valores de γ a 15° c y 1 atm para algunos gases tóxicos	23
Tabla 2.2.	Valores del exponente p de la expresión potencial de la velocidad del viento, en función de las clases de estabilidad atmosférica de Pasquill	39
Tabla 2.3.	Valores de la “longitud de rugosidad”, z_0 , propuestos por <i>Pasquill y Smith (1983)</i>	40
Tabla 2.4.	Clases de estabilidad según Pasquill, ampliada con la clase g	45
Tabla 2.5.	Relación de las clases de estabilidad según Pasquill con el <i>Número de Richardson de gradiente (Ri)</i> y la <i>Longitud de Monin Obukhov (L)</i> ...	46
Tabla 2.6.	Clases de estabilidad de Pasquill en función de la velocidad del viento, nivel de insolación y nubosidad	47
Tabla 2.7.	Índice de radiación neta durante periodos diurnos	48
Tabla 2.8.	Índice de radiación neta durante el periodo nocturno	48
Tabla 2.9.	Clases de estabilidad atmosférica en función del índice de radiación neta y de la velocidad del viento	49
Tabla 2.10.	Ejemplo de matriz de estabilidad, correspondiente a una determinada dirección de viento, en este caso la SSW	50
Tabla 3.1.	Localización de los efectos en función de la solubilidad de la sustancia en agua	74
Tabla 3.2.	Efectos y manifestaciones clínicas de las sustancias irritantes	74
Tabla 4.1.	Índices y parámetros toxicológicos utilizados para el desarrollo de los TEELs	80
Tabla 5.1.	Efectos previsibles para los diferentes niveles de los índices AEGLS, ERPGs y TEELs	87
Tabla 5.2.	AEGL 1 y 2 para el fluoruro de hidrógeno, en mg/m ³	90
Tabla 6.1.	Niveles unificados de daños y efectos para todos los índices seleccionados (AEGLS, ERPGs y TEELs)	94
Tabla 8.1.1.	Valores del índice AEGL para el cloruro de hidrógeno, expresados en mg/m ³	114
Tabla 8.1.2.	Datos de la tubería necesarios para el cálculo de la fuga	116
Tabla 8.1.3.	Datos de entrada al programa para simulación de la dispersión	117
Tabla 8.1.4.	Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente HCl-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)	117

Tabla 8.1.5.	Datos de entrada al programa ALOHA para la simulación de la dispersión	121
Tabla 8.1.6.	Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente HCl-1 en las condiciones atmosféricas más frecuentes (estabilidad D y 2.5 m/s de velocidad de viento)	123
Tabla 8.1.7.	Datos de la tubería necesarios para el cálculo de la fuga.....	125
Tabla 8.1.8.	Datos de entrada al programa para simulación de la dispersión	126
Tabla 8.1.9.	Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente HCl-2 en las condiciones atmosféricas más desfavorables. (Estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)	126
Tabla 8.1.10.	Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión	130
Tabla 8.1.11.	Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente HCl-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes (estabilidad D y 2,5 m/s de velocidad de viento)	130
Tabla 8.2.1	Valores del ERPG para el amoniaco	134
Tabla 8.2.2.	Extrapolación de los ERPGs 1 y 2 del amoniaco	134
Tabla 8.2.3.	Datos de la tubería necesarios para el cálculo de la fuga.....	136
Tabla 8.2.4.	Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión	136
Tabla 8.2.5.	Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente NH3-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)	138
Tabla 8.2.6.	Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión	140
Tabla 8.2.7.	Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente NH3-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes (estabilidad D y 2.5 m/s de velocidad de viento)..	141
Tabla 8.3.1.	Valores del índice TEEL para el isopreno.....	145
Tabla 8.3.2.	Extrapolación de los TEELs 1 y 2 del isopreno	145
Tabla 8.3.3.	Datos del charco necesarios para el cálculo de la evaporación	147
Tabla 8.3.4.	Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión	147
Tabla 8.3.5.	Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente IP-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)	149
Tabla 8.3.6.	Datos del charco necesarios para el cálculo de la evaporación	151
Tabla 8.3.7.	Datos de entrada al programa para la simulación de la dispersión	152
Tabla 8.3.8.	Concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube a diversas distancias del origen del accidente IP-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes (estabilidad D y 2.5 m/s de velocidad de viento)	152

Índice de figuras

- Figura 2.1. Esquema básico de la evolución de una nube de gas denso
- Figura 2.2. Zonas o elementos típicos a través de los que se producen con más frecuencia fugas accidentales. C: colapso de equipo o tubería. F: fisura por fallo de material o soldadura. Roturas de bridas (B), instrumentos (I), válvulas (V), prensas de bomba (S). Apertura o rotura de válvula de seguridad (VS), de purga (VP) o de disco de ruptura (DR)
- Figura 2.3. Diagrama presión-entalpía. Líneas de isopropiedades y puntos característicos: T, temperatura; S, entropía (sólo se representa una línea); D, densidad del gas o vapor (sólo se representa una línea); L_s , línea de líquido saturado; V_s , línea de vapor saturado; Crit, punto crítico; Trip, línea del punto triple
- Figura 2.4. A: transformación isoentrópica sin cambio de fase; el gas está inicialmente en 1A, a P_1 y a elevada temperatura (T_{1A}) y se expande adiabáticamente (siguiendo la isolínea S_A) hasta alcanzar la presión atmosférica, en 2A, que sigue estando en la fase gaseosa aunque a menor temperatura (T_{2A}). B: transformación isoentrópica con cambio de fase; el gas está inicialmente en 1B, a P_1 y a T_{1B} (inferior a T_{1A}) y se expande adiabáticamente (siguiendo la isolínea S_B) hasta alcanzar la presión atmosférica, en 2B, que está en la región bifásica a T_B . El punto 2B se separa en las fases vapor ($2B_v$) y líquida ($2B_l$), por donde pasan las isolíneas isoentrópicas S_{Bv} y S_{Bl} , que son las utilizadas en la ecuación 2.9.
- Figura 2.5. Expansión adiabática de una hipotética mezcla líquido-vapor desde la situación inicial (1) a la final (2), observándose el aumento de la fase vapor y la disminución de la temperatura
- Figura 2.6. Evolución de los caudales máxicos evaporados desde un charco. A: para un líquido “hirviente”. B: para un líquido “no hirviente”. La fase 1 está controlada por la transferencia de calor desde el suelo, la 2 es de transición, la 3 y el caso B están controlados por la transferencia de materia
- Figura 2.7: Rosa de los vientos. Los círculos representan frecuencias porcentuales
- Figura 2.8. Idealizaciones a escala sinóptica de los movimientos del aire en un plano vertical en los anticiclones (A) y en las borrascas (B), observándose la formación de nubosidad en la segunda de las zonas citadas

Figura 2.9.	Perfiles de velocidades del viento sobre el suelo en función de los obstáculos presentes <i>Davenport (1936)</i>	37
Figura 2.10.	Perfiles neutro (adiabático), inestable (superadiabático) y estable (subadiabático)	41
Figura 2.11.	Ejemplos de perfiles térmicos atmosféricos mixtos. A: Situación típica diurna. B: Situación típica nocturna	42
Figura 2.12.	Comparación de la temperatura potencial en el punto 1, θ_1 , con posibles temperaturas de la referencia z_{ref}	43
Figura 2.13.	Clases de estabilidad en función del inverso de la Longitud de Monin Obukhov y la longitud de rugosidad superficial, según <i>Golder (1972)</i>	46
Figura 2.14.	Coefficiente de dispersión transversal, σ_y (m), propuesto por <i>Turner (1970)</i>	53
Figura 2.15.	Coefficiente de dispersión vertical, σ_z (m) propuesto por <i>Turner (1970)</i>	54
Figura 2.16.	Nomograma para fugas instantáneas, de acuerdo con el trabajo de <i>Britter y McQuaid (1988)</i>	58
Figura 2.17	Nomograma para fugas continuas, de acuerdo con <i>Britter y McQuaid (1988)</i>	59
Figura 2.18.	Esquemas básicos de los modelos de caja. A: para nubes instantáneas, B: para nubes continuas	60
Figura 2.19.	Esquema básico del modelo HEGADAS para la dispersión de gas denso – <i>Puttock (1987b)</i> –	63
Figura 2.20.	Esquema básico del modelo de Ooms y su conexión con el modelo DEGADIS	65
Figura 3.1.	Combinación concentración-tiempo para un nivel de daño determinado para el cloro	75
Figura 5.1. A,	Perfiles variables de concentración-tiempo de exposición (t_{exp}) que se comparan con el perfil rectangular representativo de un determinado índice, definido por la concentración del índice (c_i) y el tiempo de referencia (t_r). (Los tiempos de exposición de los perfiles variables se definen para una concentración mínima de referencia – c^* –, posteriormente comentada)	89
B, C y D:		
Figura 5.2.	Representación de los valores concentración–tiempo correspondientes a los AEGLs 1 y 2 para el fluoruro de hidrógeno	90
Figura 5.3.	Extrapolaciones aplicables a los índices ERPGs (A) o TEELs (B)	92
Figura 6.1.	Perfiles típicos concentración-tiempo en enclaves situados a diversas distancias del origen del accidente ($d_1 < d_2 < \dots < d_x$) para nubes de corta duración (A) y de media o larga duración (B).....	95
Figura 6.2.	Representación genérica de los niveles 1 y 2 del índice disponible (en este caso el AEGL) y una línea típica obtenida por unión de algunas relaciones concentraciones máximas-tiempos de paso de una nube. Los puntos de corte son los límites inferiores concentración-tiempo de paso, que a partir de ellos permite determinar el alcance de las Zonas de Intervención y Alerta del accidente evaluado	96

Figura 6.3.	Líneas de isoconcentración para un mismo accidente pero con dos clases de estabilidad: muy inestable (A) y muy estable (F)	97
Figura 6.4.	Representaciones genéricas de las zonas de Intervención y Alerta para nubes tóxicas. En emergencia se conoce la dirección del viento, lo que permite delimitar las zonas afectadas (elipsoides). En planificación no es conocida la dirección del viento, por lo que las zonas afectadas se consideran circulares, con centro en el origen del accidente	98
Figura 7.1.	Secuencia general de los datos necesarios para ejecutar el programa ALOHA	100
Figura 7.1.1.	Datos solicitados para la localización geográfica del accidente	101
Figura 7.1.2.	Datos solicitados para determinar la incidencia de la nube tóxica en el interior de un edificio	102
Figura 7.1.3.	Propiedades solicitadas para incorporar en la base de datos una sustancia nueva	102
Figura 7.1.4.	Secuencia para determinar la clase de estabilidad atmosférica	103
Figura 7.1.5.	Ventanas para la introducción de los datos meteorológicos. El programa determina la clase de estabilidad	104
Figura 7.1.6.	Datos de entrada para determinar el caudal de emisión desde un charco	105
Figura 7.1.7.	Parámetros solicitados para determinar las emisiones cuando el equipo afectado es un tanque	106
Figura 7.1.8.	Datos de entrada para determinar la cantidad o el caudal de emisión desde una tubería	107
Figura 7.1.9.	Selección del modelo de dispersión y exponente n para calcular la dosis	108
Figura 7.1.10A.	Datos de entrada para situar el punto donde se desea determinar la concentración y la dosis, utilizando coordenadas rectangulares	108
Figura 7.1.10B.	Datos de entrada para situar el punto donde se desea determinar la concentración y la dosis, utilizando coordenadas geográficas	109
Figura 7.2.	Isopleta correspondiente al valor LOC	110
Figura 7.3.	La línea continua corresponde al perfil concentración-tiempo para una determinada posición, en el exterior. La línea discontinua próxima al eje de abscisas es la concentración en el interior del edificio seleccionado	110
Figura 7.4.	Perfil dosis-tiempo para una determinada posición, en el exterior. La línea discontinua próxima al eje de abscisas es la dosis en el interior del edificio seleccionado	111
Figura 7.5.	Perfil caudal de fuga-tiempo	111
Figura 8.1.1	Representación de los valores del índice AEGL para el cloruro de hidrógeno	114
Figura 8.1.2.	Perfiles concentración – tiempo de la nube a 500, 1000, 3000 y 5000 m del origen del accidente HCl-1 para las condiciones atmosféricas más desfavorables (Estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)	118

Figura 8.1.3.	Representación de las concentraciones máximas y tiempos de exposición y de paso de la nube del escenario HCl-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables, conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2. Los puntos de corte permiten determinar las zonas de planificación para este accidente	119
Figura 8.1.4.	Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA	120
Figura 8.1.5.	Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA	120
Figura 8.1.6.	Perfiles de concentración-tiempo de la nube a 250, 500, 1000 y 2500 m del origen del accidente HCl-1 para las condiciones atmosféricas más frecuentes (Estabilidad D y 2.5 m/s de velocidad de viento)	122
Figura 8.1.7.	Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube del escenario HCl-1 en las condiciones atmosféricas más frecuentes conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2. Los puntos de corte permiten determinar las zonas de planificación para este accidente	123
Figura 8.1.8.	Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA	124
Figura 8.1.9.	Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA	124
Figura 8.1.10.	Perfiles concentración – tiempo de la nube a 1000, 4000, 5000 y 6000 m del origen del accidente HCl-2 para las condiciones atmosféricas más desfavorables (Estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)	127
Figura 8.1.11.	Representación de las concentraciones máximas y tiempos de exposición y de paso de la nube del escenario HCl-2 en las condiciones atmosféricas más desfavorables, conjuntamente con los valores AEGL-1 y AEGL-2. Los puntos de corte permiten determinar las zonas de planificación para este accidente	128
Figura 8.1.12.	Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA	129
Figura 8.1.13.	Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA	129
Figura 8.1.14.	Perfiles concentración – tiempo de las nubes a 1000, 3000, 4000 y 5500 m del origen del accidente HCl-2 para las condiciones atmosféricas más frecuentes (Estabilidad D y 2,5 m/s de velocidad de viento)	131
Figura 8.1.15.	Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso de las nube del escenario HCl-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes, conjuntamente con los índices AEGL-1 y AEGL-2	132

Figura 8.1.16. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA	133
Figura 8.1.17. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA	133
Figura 8.2.1. Extrapolación del ERPG-1 y ERPG-2 del amoniaco	135
Figura 8.2.2. Perfiles concentración – tiempo de la nube a 1500, 2000, 3000 y 3500 m del origen del accidente NH3-1 para las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)	137
Figura 8.2.3. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso y de exposición de la nube del escenario NH3-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables, conjuntamente con la extrapolación de los índices ERPGs niveles 1 y 2	139
Figura 8.2.4. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA	139
Figura 8.2.5. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA	140
Figura 8.2.6. Perfiles concentración – tiempo de la nube a 1000, 1500, 2000 y 3000 metros del origen del accidente NH3-2 para las condiciones atmosféricas más frecuentes (estabilidad D y 2.5 m/s de velocidad de viento)	142
Figura 8.2.7. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de paso de la nube del escenario NH3-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes conjuntamente con la extrapolación de los índices ERPG1 y ERPG2	143
Figura 8.2.8. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA	143
Figura 8.2.9. Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA	144
Figura 8.3.1. Extrapolación del TEEL-1 y TEEL-2 del isopreno	145
Figura 8.3.2. Perfiles concentración – tiempo de la nube a 1500, 2000, 3000 y 3200 m del origen del accidente IP-1 para las condiciones atmosféricas más desfavorables (estabilidad F y 2 m/s de velocidad de viento)	148
Figura 8.3.3. Representación de las concentraciones máximas y tiempos de exposición y de paso de la nube del escenario IP-1 en las condiciones atmosféricas más desfavorables conjuntamente con la extrapolación de los índices TEEL-1 y TEEL-2	149
Figura 8.3.4. Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA	150

Figura 8.3.5.	Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.....	150
Figura 8.3.6.	Perfiles concentración – tiempo de la nube a 1000, 2000, 3000 y 3500 m del origen del accidente IP-1 para las condiciones atmosféricas más frecuentes, (estabilidad D y 2,5 m/s de velocidad de viento).....	153
Figura 8.3.7.	Representación de las concentraciones máximas y tiempos de exposición y de paso de la nube del escenario IP-2 en las condiciones atmosféricas más frecuentes conjuntamente con la extrapolación de los índices TEEL-1 y TEEL-2.....	154
Figura 8.3.8.	Representación de la Zona de Intervención (línea continua) y de “posible afectación” (línea discontinua), proporcionada por el programa ALOHA.....	154
Figura 8.3.9.	Representación de la Zona de Alerta (línea continua) y de “posible afectación”, (línea discontinua) proporcionada por el programa ALOHA.....	155