
MÓDULO: RIESGOS LABORALES, INDUSTRIALES Y MEDIOAMBIENTALES

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS (A.C.R.):
SU UTILIDAD Y NECESIDAD

PASTORA M^a FERNÁNDEZ ZAMORA

eoi

SUMARIO

1. INTRODUCCIÓN	5
2. MARCO LEGAL DE REFERENCIA.....	7
3. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE UN A.C.R.	9
3.1. Definición de objetivos y profundidad del A.C.R.	9
3.2. Descripción del sistema	9
3.3. Identificación de riesgos.....	10
3.4. Enumeración y selección de escenarios	12
3.5. Determinación de las consecuencias	12
3.6. Determinación de las probabilidades	12
3.7. Determinación del riesgo.....	13
3.8. Evaluación del riesgo	13
4. ALCANCE DE LOS A.C.R.....	17
5. ANÁLISIS CUALITATIVOS FRENTE A A.C.R.	21
5.1. Principales cualidades de los métodos cualitativos.....	21
5.2. Ventajas e inconvenientes de los A.C.R. frente a los análisis cualitativos.....	22
6. LOS A.C.R Y LA POLÍTICA DE UTILIZACIÓN DEL SUELO	25
7. CONCLUSIONES.....	27
ANEXO.....	29

eoi

1 INTRODUCCIÓN

Dentro del ámbito del Análisis y Prevención de Riesgos en la Industria, llega el turno a los Análisis Cuantitativos de Riesgo (A.C.R.) de Plantas Industriales. Los objetivos que se persiguen con la presentación consisten básicamente en responder a las siguientes preguntas:

- ¿En qué casos se debe realizar un A.C.R.?
- ¿Cuál es la metodología a aplicar para los mismos? ¿Con qué alcance?
- ¿Cuáles son los posibles usos de un A.C.R.?

Seguidamente se desarrollarán respuestas a cada una de estas preguntas, con objeto de que se adquiera una visión general acerca de los A.C.R., una de las técnicas más potentes y desconocidas en el ámbito de la Seguridad Industrial.

eoi

2 MARCO LEGAL DE REFERENCIA

Para responder a la primera de las preguntas resulta necesario conocer, en primer lugar, cuál es el marco legal de referencia en el ámbito de los A.C.R.

El concepto de Análisis Cuantitativo de Riesgos (A.C.R.) se introduce en la legislación española a través del Real Decreto 886/88, sobre Prevención de Accidentes Mayores. En su artículo 7º se indica expresamente "en casos excepcionales, la autoridad competente podrá exigir un A.C.R."

Posteriormente, la antigua "Directriz Básica", en su artículo 3.1 matiza que, en tal caso, la Autoridad Competente deberá dar "un razonamiento justificativo de tal requerimiento". Por otra parte, en su apartado 3.4, describe los contenidos aconsejados para la realización de un A.C.R., al mismo tiempo que define el límite a partir del cual serán necesarias medidas correctoras. Este límite está situado en 10^{-6} víctimas/año para el Riesgos Individual.

En lo que respecta a la actualización de la citada normativa, ni en la Directiva Seveso II (Directriz 96/82/CE) relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, ni en el Real Decreto 1254/1999 por el que se traspone dicha directiva, se hace mención expresa a los A.C.R., si bien se hacen comentarios de gran interés en el ámbito de los A.C.R.

La "Directriz Básica" nueva, recientemente publicada, indica que la Autoridad competente en cada caso fijará los criterios de aceptabilidad del riesgo. De acuerdo con la documentación internacional consultada se puede considerar que el máximo riesgo admisible proporcionado por una actividad industrial es de 10^{-6} víctimas/año para el riesgo individual.

Tomando como base lo indicado en la Directiva Seveso II podemos destacar:

- Dentro de los objetos del informe de seguridad se encuentra el "proporcionar **información suficiente** a las autoridades competentes para que se puedan tomar decisiones en materia de **implantación de nuevas actividades** o de ejecución de obras en las proximidades de los establecimientos existentes". (Art. 9. 1.e).

- Los Estados miembros velarán por que su política de asignación o utilización del suelo y otras políticas pertinentes, así como los procedimientos de aplicación de dichas políticas, tengan en cuenta la necesidad, a largo plazo, de mantener las **distancias adecuadas** entre, por una parte, los establecimientos contemplados en la presente Directiva y, por otra, las zonas de vivienda, las zonas frecuentadas por el público y las zonas que presenten un interés natural particular de carácter especialmente delicado, y, para los establecimientos existentes, **medidas técnicas complementarias** de conformidad con el artículo 5, con el fin de no aumentar los riesgos para las personas (Art. 12.1).
- Los Estados miembros velarán por que todas las autoridades competentes y todos los servicios facultados para tomar decisiones en este ámbito establezcan procedimientos de consulta adecuados para facilitar la aplicación de las políticas adoptadas con arreglo al apartado I. Los procedimientos serán tales que en el momento de tomar las decisiones se disponga de un **dictamen técnico sobre los riesgos** vinculados al establecimiento, basado en el estudio de casos concretos o en criterios generales (Art. 12.2).

En base a lo anteriormente indicado, cabe apuntar como razones justificativas de la necesidad de realizar un A.C.R. las siguientes:

- El cumplir con el requerimiento dado por la Autoridad Competente.
- Demostrar que se mantienen distancias adecuadas con respecto a elementos vulnerables del entorno de la instalación.

Más adelante desarrollaremos en detalle dónde puede surgir el requerimiento de la Administración así como las diferentes interpretaciones que pueden darse al término "distancias adecuadas". Asimismo, se analizarán otras posibles utilidades del A.C.R., desde el enfoque de la gestión del riesgo.

3 METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE UN A.C.R.

En los A.C.R. se determinan los niveles de **riesgo** que se generan como consecuencia de una determinada actividad industrial. Comencemos, por tanto, por definir el concepto de riesgo, que, en pocas palabras, puede definirse como la **probabilidad** de que se genere un cierto nivel de **daños**.

Por tanto, para realizar un A.C.R. se deben identificar una serie de accidentes representativos de la instalación, para calcular a continuación la probabilidad de que se produzcan dichos accidentes así como sus daños. La combinación final de todos estos factores lleva a una medida global del riesgo asociado a la actividad analizada.

La Figura 3.1 muestra un esquema general del proceso de realización de un A.C.R., con las etapas que se presentan a continuación, en el que además se incluye un método de priorización de cálculos.

En el Anexo se desarrolla con mayor profundidad cada una de las etapas que se presentan a continuación.

3.1 DEFINICION DE OBJETIVOS Y PROFUNDIDAD DEL A.C.R.

Antes de iniciar este tipo de estudios resulta imprescindible definir la finalidad del mismo, así como sus objetivos. En base a ello se decidirá sobre los valores de Riesgo que se desean determinar y los formatos de presentación necesarios. De todo ello, se concluirá la profundidad que resulte necesaria para el estudio así como la lista de información necesaria.

3.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA

Consiste en la recopilación y elaboración de toda la información que resultará necesaria durante el desarrollo del A.C.R. Esto incluye:

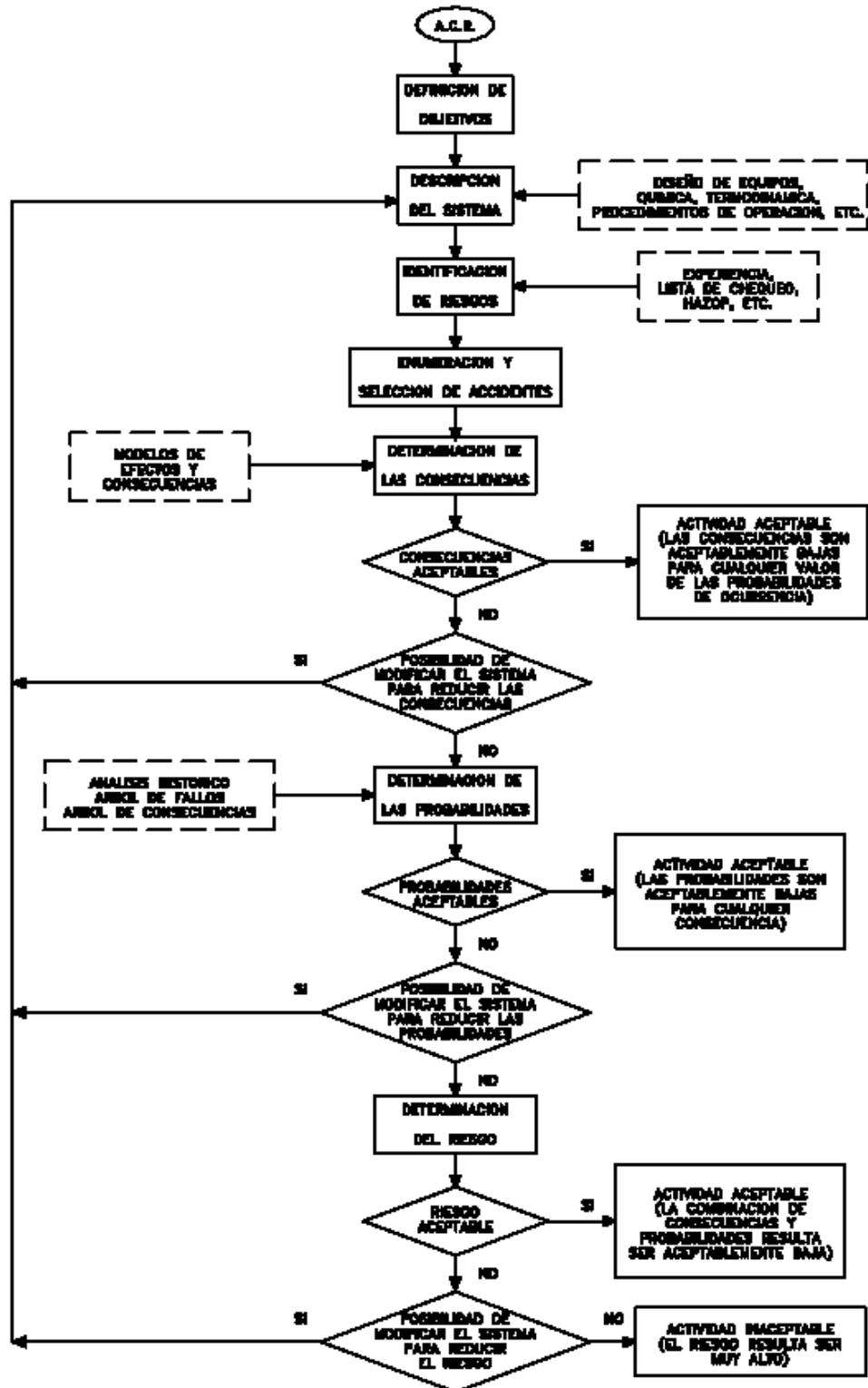
- La localización y entorno.
- Datos de condiciones meteorológicas.
- Diagramas de flujo, tuberías e instrumentos (P&I).
- Planos de implantación.
- Procedimientos de operación y mantenimiento.
- Documentación tecnológica.
- Datos de propiedades fisico-químicas, etc.

3.3 IDENTIFICACION DE RIESGOS

Este es un paso crítico en el A.C.R., ya que de ello depende la bondad del resultado. Existe una gran variedad de técnicas disponibles como son:

- Listas de chequeo.
- Indices de riesgo.
- Análisis "What if?"
- HAZOP.
- Análisis de Modos de Fallo y Efectos (FMEA).
- Análisis de riesgo preliminar (PHA).
- Uso de Bases de Datos de accidentes.

FIGURA 3.1: ESQUEMA DE REALIZACION DE UN A.C.R.



3.4 ENUMERACION Y SELECCION DE ESCENARIOS

Una vez identificados los accidentes que pueden darse, con independencia de su importancia o suceso iniciador, se realiza una **selección** de aquellos **accidentes** que resultan **representativos** de todos los escenarios de accidente identificados. Para todos los accidentes finalmente seleccionados se identifican los diferentes desarrollos a que pueden dar lugar para su posterior estudio.

3.5 DETERMINACION DE LAS CONSECUENCIAS

Para determinar las consecuencias asociadas a los accidentes en un A.C.R., el proceso a seguir es el siguiente:

- Seleccionar los modelos de consecuencias apropiados, así como el método de estimación de probabilidades y el algoritmo de integración de todos estos resultados para la obtención y adecuada presentación del riesgo.
- Determinar cada uno de los **desarrollos accidentales** en los que puede desembocar el accidente, según la técnica del árbol de sucesos.
- Realizar el **calculo de efectos** del accidente: caudal de fuga, evaporación, dispersión, radiación, explosión, etc.
- Determinar las consecuencias para las personas, los bienes o el medio ambiente, asociadas a estos efectos físicos, mediante los valores umbrales asociados a la radiación, sobrepresión o toxicidad.

3.6 DETERMINACION DE LAS PROBABILIDADES

Como se ha indicado, el concepto de riesgo implica una doble vertiente: daños (es decir, consecuencias) y probabilidad. Por tanto, para cada uno de los desarrollos accidentales identificados es necesario determinar su probabilidad de ocurrencia, que dependerá de la probabilidad tanto del **suceso iniciador** como de las diferentes evoluciones posibles. Las

estimaciones de estas probabilidades se pueden obtener en base a:

- Datos históricos de frecuencias de fallo.

- Métodos de modelización:
 - Análisis de árbol de fallos.
 - Análisis de árbol de sucesos.

3.7 DETERMINACION DEL RIESGO

Mediante la adecuada combinación del resultado del cálculo de consecuencias y de la estimación de probabilidades, se obtiene el valor del riesgo provocado por la actividad industrial.

Para ello se calcula el riesgo asociado a cada una de las evoluciones de un accidente y se suman para todos los accidentes seleccionados en cada localización del entorno. Los dos parámetros más usuales para la representación del riesgo son:

- Riesgo Individual.
Se define como la probabilidad por año de que una persona situada en una determinada localización del entorno de una actividad resulte letalmente afectada por un accidente en la citada actividad. Proporciona el valor del riesgo para cada localización en los alrededores, no tomando en consideración la densidad de población ya que sólo depende de la localización respecto de la actividad industrial.
- Riesgo de Grupo.
Representa la probabilidad acumulada de que se produzca un número mínimo de letalidades simultáneas en los alrededores. Toma en consideración la densidad de población en los alrededores, sin embargo, al integrar las consecuencias para todas las posiciones, no proporciona información sobre el riesgo en las diferentes localizaciones del entorno.

3.8 EVALUACION DEL RIESGO

Se denomina Evaluación del Riesgo al proceso mediante el cual a partir de los resultados del Análisis Cuantitativo de Riesgo se realiza una **comparación** con los valores de referencia y en su caso, se plantean una serie de medidas de reducción del riesgo.

El valor de referencia según la legislación española se ha establecido sólo para el **riesgo individual** y se ha fijado en 10⁶ víctimas/año.

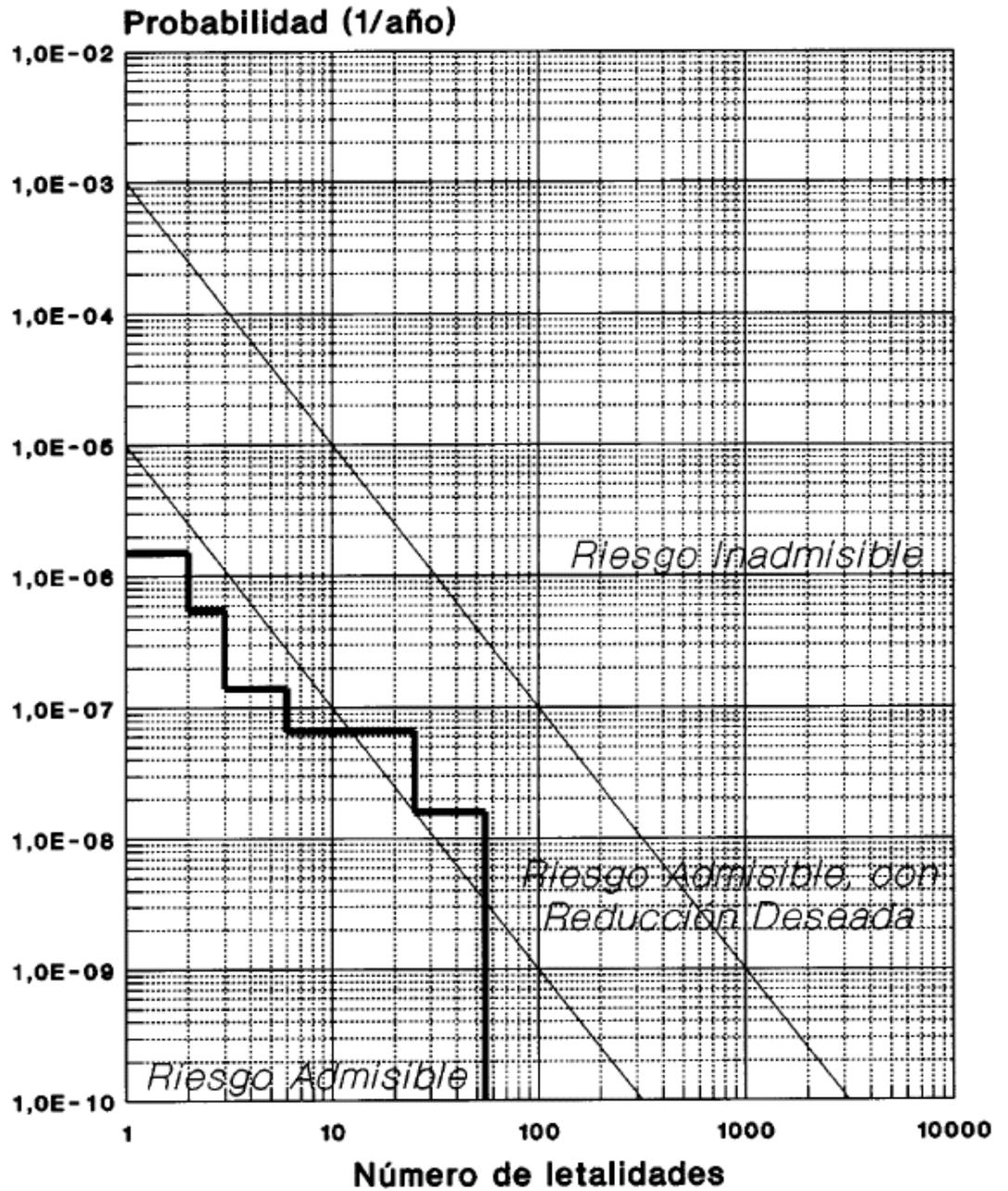
Otras legislaciones, como la holandesa, presentan unas especificaciones del riesgo más completas definiendo límites para el riesgo individual y de grupo y al mismo tiempo zonas de riesgo inadmisibles, con reducción deseable y admisible:

- Riesgo individual.
 - Riesgo admisible: $R.I. < 10^{-8}$ víctimas/año
 - Riesgo con reducción deseable: 10^{-8} víctimas/año $< R.I. < 10^{-6}$ víct./año
 - Riesgo inadmissible: $R.I. > 10^{-6}$ víctimas/año

- Riesgo de grupo.

Los límites se encuentran definidos en la Figura 3.2, donde además se muestra un ejemplo (línea de trazo grueso) de curva de riesgo de grupo.

FIGURA 3.2: LIMITES AL RIESGO DE GRUPO



eoi

4 ALCANCE DE LOS A.C.R.

Un Análisis de Riesgo, en su acepción más amplia, puede incluir desde un estudio de aproximación hasta un detallado estudio que contemple una gran cantidad de accidentes y haga uso de sofisticados modelos de cálculo de consecuencias y probabilidades. Entre estos dos extremos existe una gran cantidad de diferentes posibilidades para la realización de Análisis de Riesgos.

Para entender correctamente cuál puede ser el alcance del estudio que se necesita, resulta muy práctico representar los tres factores principales que definen este alcance en un cubo (Figura 4.1) cuyos ejes son:

- Técnica de determinación del Riesgo.
- Complejidad del estudio.
- Número de accidentes seleccionados.

Las **técnicas de determinación del riesgo** pueden ir, en orden de complejidad, desde el exclusivo cálculo de las consecuencias, pasando por una estimación adicional de probabilidades, hasta una determinación del riesgo propiamente dicha, mediante la conjunción de los dos parámetros anteriores.

La **complejidad del estudio** depende fundamentalmente de dos factores:

- La complejidad de los modelos usados. Esta puede variar desde una simple ecuación algebraica hasta complicados modelos que se usan para estimar la dispersión atmosférica de gases densos.
- El número de casos o situaciones a estudiar, que puede ir desde un sólo caso (asumiendo una única velocidad de viento y estabilidad atmosférica), hasta diferentes combinaciones de estos u otros parámetros según el accidente a estudiar.

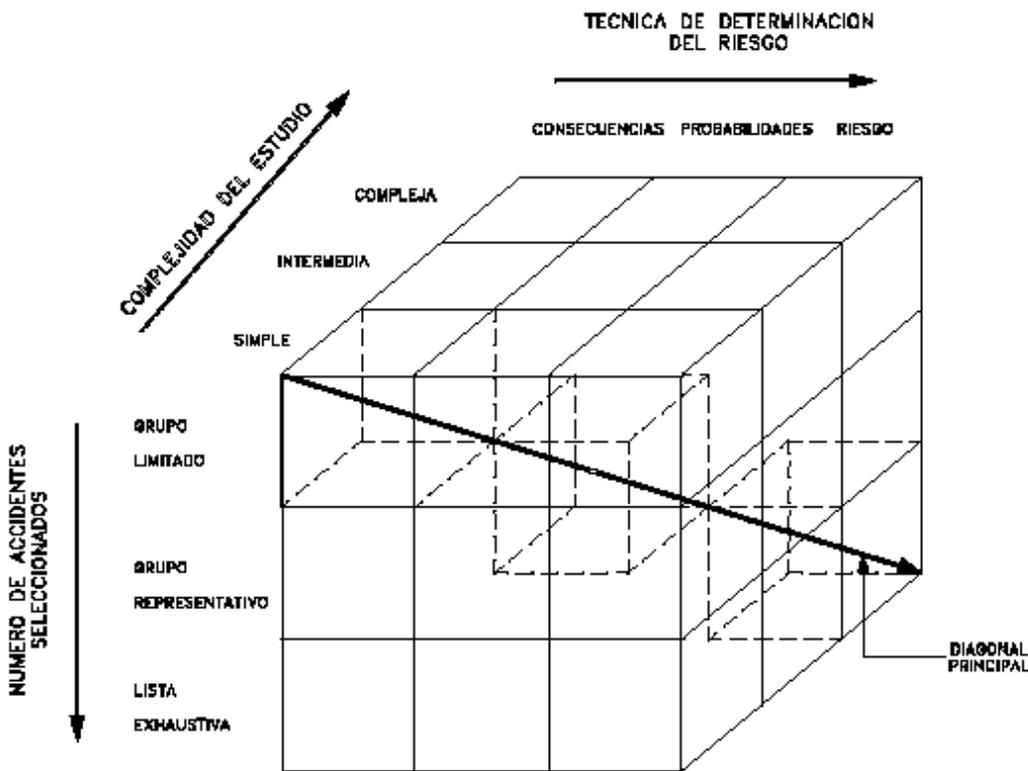


FIGURA 4.1: ALCANCE DEL ESTUDIO

El **número de accidentes seleccionados** es la última variable de importancia a la hora de definir el alcance del estudio. Este número puede reducirse a un grupo limitado, que sólo incluya el/los peor/es accidente/s creíble/s (W.C.A.) o posible/s (W.P.A.) (dejando a un lado el amplio espectro de accidentes que generalmente proporcionan la mayor parte del riesgo). Por otro lado puede incluir una exhaustiva lista de accidentes o como término medio un grupo representativo de los mismos (que en los casos en los que se trata de evaluar riesgos para la población, suele incluir sólo accidentes graves).

De este modo, la determinación del alcance de un Análisis de Riesgo pasa por fijar previamente en qué posición de los ejes que definen el cubo del estudio nos encontramos. En sentido estricto, sólo hablaremos de Análisis Cuantitativo de Riesgo cuando la técnica empleada llegue a una determinación del Riesgo propiamente dicha.

Idealmente, cualquier análisis debería incluir todos los posibles accidentes. Sin embargo, las evidentes limitaciones de tiempo y costo obligan a una optimización del número de accidentes estudiados.

A continuación en la Tabla 4.1 se presentan de forma general unas sugerencias a la hora de elegir el número de accidentes necesarios en función del propósito de nuestro estudio.



SELECCION DE ACCIDENTES SEGUN EL PROPOSITO DEL ESTUDIO

PROPOSITO	CARACTERISTICAS	NUMERO DE ACCIDENTES A SELECCIONAR
Evaluación de medidas de reducción de riesgo	Se tienen que identificar los accidentes que más contribuyen al riesgo	Es necesario estudiar una lista exhaustiva de accidentes o al menos un grupo representativo de ellos
Estimación del riesgo para los empleados	Ha de comprobarse el cumplimiento con los límites fijados para los trabajadores	Normalmente, los accidentes catastróficos no suelen contribuir en gran medida al riesgo total para los empleados. Se debe seleccionar una lista exhaustiva de accidentes con efectos de corto y medio alcance
Estimación del riesgo para el exterior	Se tiene que comprobar el cumplimiento con los límites fijados por las autoridades	Se debe seleccionar un grupo representativo de los accidentes con consecuencias para el exterior (catastróficos)
Planificación de las emergencias	Se han de estimar las zonas de vulnerabilidad para la planificación de las emergencias	Normalmente, un grupo limitado de accidente suele bastar para este propósito. Este grupo debe incluir los peores accidentes creíbles y/o posibles (WCA y/o WPA)



5 ANÁLISIS CUALITATIVOS FRENTE A A.C.R.

5.1 PRINCIPALES UTILIDADES DE LOS MÉTODOS CUALITATIVOS

En los últimos tiempos han cobrado una gran relevancia los análisis cualitativos de riesgo. De entre las técnicas utilizadas, destaca sobre las demás el "Método del Grado de Peligrosidad", comúnmente conocido por el autor que lo desarrolló (William Fine). El método FINE, de uso extensivo en el campo de la seguridad laboral, entraría dentro de la categoría de análisis cualitativos, del tipo de los índices de riesgo.

Los índices de riesgo, en general, y el método Fine, como principal exponente, tienen su principal aplicación en la **priorización** de los riesgos o de las medidas correctas que deban aplicarse para evitarlos/mitigarlos.

De las muchas versiones que circulan sobre el método FINE, la que se presenta a continuación consta de 3 elementos: Consecuencias (C), Probabilidad (P) y Riesgo Resultante (RR). Los criterios utilizados para la evaluación de riesgos son los siguientes:

- **C:** Nivel de las Consecuencias asociadas al riesgo:
 - L: Ligeramente dañino.
 - D: Dañino.
 - E: Extremadamente dañino.
- **P:** Probabilidad de que se materialice el riesgo:
 - B: Baja.
 - M:Media.
 - A: Alta.
- **RR:** Riesgo resultante, en función de los valores de C y P, habiéndose distinguido las siguientes posibilidades:

RIESGO RESULTANTE (RR)			
CONSECUENCIAS (C) PROBABILIDAD (P)	LIGERAMENTE DAÑINO (L)	DAÑINO (D)	EXTREMADAMENTE DAÑINO (E)
BAJA (B)	Riesgo mínimo: N	Riesgo tolerable: T	Riesgo Moderado: M
MEDIA (M)	Riesgo tolerable: T	Riesgo moderado: M	Riesgo Importante: I
ALTA (A)	Riesgo moderado: M	Riesgo importante: I	Riesgo extremo: X

Haciendo uso de esta sencilla técnica, podremos ordenar los riesgos atendiendo a su Riesgo Resultante, de manera que los recursos (limitados) de los que se disponen en materia preventiva se orienten a paliar los riesgos extremos, importantes y moderados, en ese orden, para luego solventar los riesgos tolerables y nimios, si existieran recursos disponibles.

La aplicación de los métodos cualitativos, según se ha visto, resultan de una grandísima utilidad a la hora de priorizar riesgos, si bien se muestran claramente insuficientes para los requerimientos de tipo legal que usualmente se asocian a los A.C.R. (ver punto siguiente).

Como es lógico, la utilización de los A.C.R. permite la priorización de riesgos al igual que sucede con los métodos cualitativos. No obstante, si éste es el único fin que se persigue con dicha medida, podríamos decir que estaríamos "matando moscas a cañonazos".

5.2 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS ACR FRENTE A LOS ANÁLISIS CUALITATIVOS

Tal y como se ha indicado, uno de los resultados de los A.C.R. son las denominadas líneas isorriesgo, es decir, líneas que unen puntos sometidos a un mismo nivel de riesgo individual, presentado en forma de nº víctimas/año que pueden generarse como consecuencia de una instalación industrial.

Una de las utilidades de los programas informáticos empleados para realizar tales cálculos es la de determinar cuáles son los accidentes que contribuyen en mayor medida a generar un determinado nivel de riesgo en un punto concreto. Ello resulta del máximo interés cuando se trata de determinar el riesgo existente en zonas habitadas.

Una vez seleccionados los accidentes que contribuyen más a dicho riesgo, se podrían plantear medidas correctoras con objeto de disminuir las probabilidades, las consecuencias o una combinación de éstas.

Para ello se pueden aplicar diversas técnicas, destacando sobre las demás:

- La del árbol de fallos, cuando se trata de reducir la probabilidad de que se produzca el accidente, y éste se deba a una combinación de fallos elementales.
- La del árbol de sucesos, cuando resulta posible identificar varios desarrollos accidentales (con probabilidades diferentes) para un mismo suceso iniciador de los mismos.

Haciendo uso de estas técnicas, podremos determinar los accidentes que más contribuyen a generar un determinado nivel de riesgos en un punto determinado de los alrededores, así como cuáles son las causas que más contribuyen a generar dichos accidentes, de manera que la aplicación de medidas correctoras se realice desde la perspectiva del coste-benéfico, entendido éste último como porcentaje de reducción de riesgos alcanzado tras la implantación de la medida correctora.

eoi

6 LOS A.C.R. Y LA POLÍTICA DE UTILIZACIÓN DEL SUELO

Tal y como se apuntó en el Capítulo 2 al hablar del marco legal de referencia, es previsible que tras la aparición de la Directiva SEVESO II, una de las principales aplicaciones del A.C.R. se centre en apoyar técnicamente la política de asignación o utilización del suelo.

En efecto, uno de los requerimientos de la Directiva es la de que se establezcan procedimientos en orden a mantener las **distancias adecuadas** entre el establecimiento bajo el ámbito de la Directiva y los elementos vulnerables de su entorno.

Las **distancias de vulnerabilidad** en Seguridad Industrial se definen en base a las Zonas de Intervención (Z.I.) y Alerta (Z.A.). Los valores umbrales, es decir, los niveles de radiación, sobrepresión o toxicidad utilizados para definir dichas zonas están orientados a proteger a la población de efectos adversos.

En el ámbito de los A.C.R., por su parte, es necesario definir el riesgo medido como probabilidad de que se produzcan diferentes niveles de muerte. Los radios de consecuencias que miden el porcentaje de muertes esperables como consecuencia de un accidente se denominan **Zonas de Letalidad**. Para su determinación se hace uso de niveles de radiación, sobrepresión o toxicidad superiores a los utilizados para las citadas Z.I. y Z.A. En otras palabras, ante un determinado accidente, las zonas donde es esperable que se produzcan letalidades serán más cercanas a la Instalación que aquéllas destinadas a la protección de la población. En definitiva, las distancias de letalidad resultan inferiores, a las resultantes para Z.I. y Z.A.

Dicho esto, es evidente que la utilización de las distancias de vulnerabilidad a la hora de definir el concepto de "distancias adecuadas" llevaría a hacer más restrictivos los criterios de planificación del suelo, haciendo que la situación de buena parte de las instalaciones actuales no estuviesen acorde a estos criterios.

La utilización de zonas de letalidad y, más aún, de líneas de isoriesgo viene, por un lado, a racionalizar dicho problema, siendo además consistentes con la mayoría de reglamentaciones actuales en otros países europeos. Además,

el uso de A.C.R. permitirá introducir medidas técnicas complementarias en aquellos elementos de la instalación hasta llevar los niveles de riesgo a niveles aceptables con criterios técnicos bien fundados.



7 CONCLUSIONES

Tal y como se ha podido comprobar a lo largo de la sesión, la utilidad de los A.C.R. no consiste sólo en asegurar el cumplimiento de los límites impuestos, sino que resulta ser una eficaz herramienta de valoración con potentes utilidades en sí misma.

Entre las utilidades que se han indicado se puede destacar:

- Cumplir con la solicitud realizada por la Administración.
- Identificación de las medidas de reducción del riesgo más efectivas (análisis costebeneficio) en una planta existente.
- Establecimiento de un orden de prioridades para la aplicación de medidas de reducción del riesgo.
- Adecuación de emplazamientos para una actividad industrial, en función de los niveles de riesgo que se alcance en los elementos vulnerables del entorno.

eoi

**ANEXO I:
DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE
REALIZACIÓN DE LOS A.C.R.**

eoi

1. IDENTIFICACION DE RIESGOS. ENUMERACION Y SELECCION DE ESCENARIOS

Tal y como se ha comentado, este paso es fundamental para todo análisis de riesgos, pero resulta ser de mucha mayor importancia en el caso de un Análisis Cuantitativo de Riesgo (A.C.R.), dado que el objetivo de un A.C.R. es determinar el riesgo inducido en las inmediaciones por los accidentes que se pueden producir en las instalaciones. Teniendo en cuenta la complejidad de un A.C.R., son desechados en la etapa de identificación de accidentes aquellos cuya contribución al riesgo total resulte despreciable, bien por su probabilidad de ocurrencia, o por su nivel de consecuencias.

Sin entrar a enumerar y describir las diferentes metodologías de identificación de riesgos que existen, sí resulta necesario discutir sobre las características que debe cumplir una Identificación de Escenarios para que resulte apropiada para el A.C.R.

El propósito de la identificación es obtener un conjunto apropiado de accidentes, es decir, el mínimo número de accidentes necesarios para satisfacer los requerimientos del A.C.R. y que representen adecuadamente todos los accidentes que se pueden dar en las instalaciones, tomando en consideración por supuesto, las limitaciones de presupuesto y programación. En este sentido resulta posible reducir el número de accidentes a estudiar en función de varios factores:

- Magnitud de sus consecuencias. El objetivo de un A.C.R., según la legislación española, es comprobar que no se sobrepasan los límites de riesgo en el exterior de las instalaciones y en concreto para las zonas pobladas. Por ello, la contribución a este riesgo de los accidentes cuyas consecuencias **no alcanzan al exterior** resulta ser nula y por tanto **no será necesario** incluirlos en un estudio de este tipo.
- Probabilidad de ocurrencia. Generalmente los accidentes con consecuencias más catastróficas (Peor accidente posible - W.P.A.-) suelen tener muy bajas probabilidades de ocurrencia, contribuyendo en muy baja medida al riesgo inducido por la instalación en muchos de los casos.
- Similitud de consecuencias. Al objeto de reducir los cálculos necesarios, es importante agrupar aquellos accidentes redundantes o muy parecidos (teniendo en cuenta los inventarios de material, composición, caudales de fuga, localización, etc.) de forma que cada grupo quede representado por un accidente equivalente.

Este proceso extraordinariamente delicado exige para su realización de personal experto en la elaboración de A.C.R., sin cuya experiencia no resulta aconsejable abordar una selección y reducción de accidentes. En el caso de un preestudio, la selección de accidentes puede limitar éstos a tres o cuatro, y sin embargo, conseguir unos resultados de cierta representatividad.

Finalmente, para diferenciar la identificación de riesgos realizada para un Estudio de Seguridad (según lo exigido por la Directriz Básica) de la realizada para un A.C.R., es preciso indicar que:

- Para un A.C.R. el conjunto de accidentes identificados debe ser representativo de las consecuencias que se pueden producir y además, se deben representar convenientemente las probabilidades de ocurrencia de cada grupo de accidentes.
- Para un E.S. el conjunto de accidentes identificados debe únicamente ser representativo de las consecuencias, sin necesidad de tomar en consideración las probabilidades de ocurrencia.

Finalmente, y una vez seleccionados los accidentes que van a ser tenidos en cuenta en la realización del A.C.R., hay que definir el árbol de sucesos a que pueden dar lugar estos accidentes. Para ello es preciso analizar dos factores:

- Consecuencias y evoluciones del accidente.
- Condiciones que van a ser estudiadas.

A. CONSECUENCIAS Y EVOLUCIÓN DEL ACCIDENTE.

Esta fase, propia de la etapa de cálculo de efectos y consecuencias, determina las posibles evoluciones de un accidente en cuanto a sus efectos físicos (formación de charco, evaporación, ignición, dispersión, etc.) y por tanto las posibles consecuencias.

B. Condiciones que van a ser estudiadas.

Para cada una de estas evoluciones, es necesario definir para que condiciones (atmosféricas, de proceso, etc.) se va a realizar el análisis.

La Figura I.1 es un claro ejemplo del grado de complejidad que puede derivarse a partir de un accidente determinado.

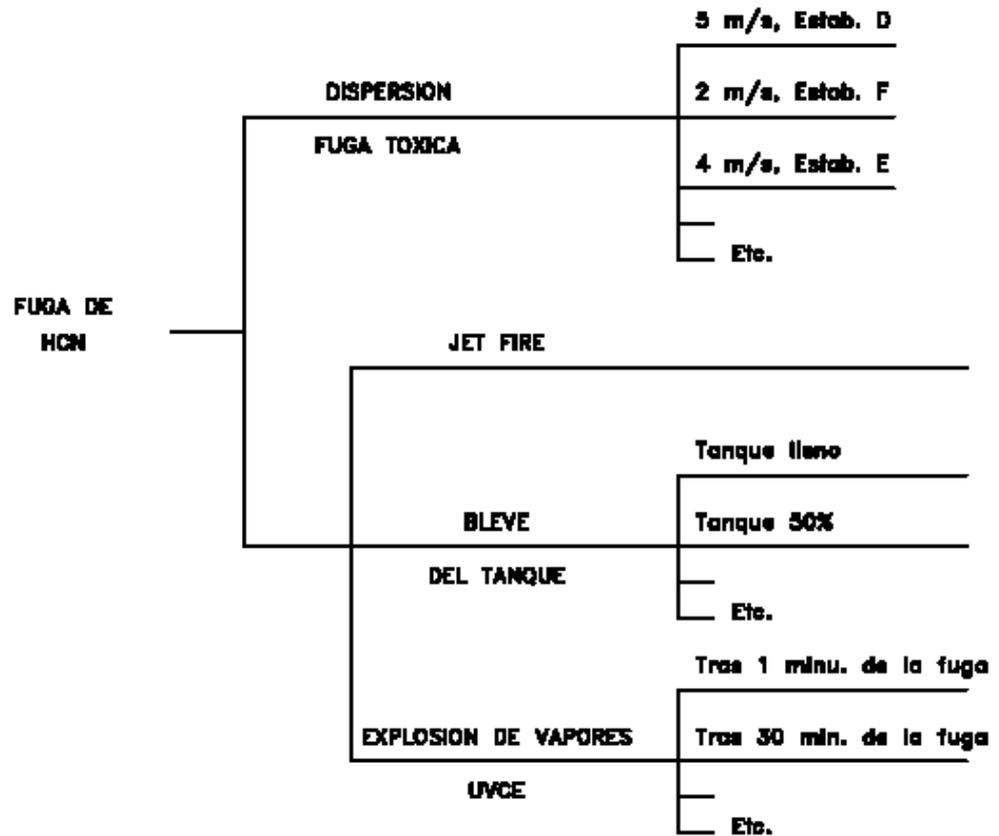


FIGURA I.1: DESARROLLO DE UN ACCIDENTE IDENTIFICADO

2. DETERMINACION DE LOS EFECTOS Y LAS CONSECUENCIAS

El siguiente paso en la elaboración de un A.C.R. consiste en determinar los efectos físicos y las consecuencias derivadas de cada uno de los accidentes identificados. Habrá que realizar los cálculos para cada una de las posibles evoluciones de un accidente y para cada una de las condiciones que vayan a ser estudiadas tal y como se ha descrito anteriormente.

El cálculo de efectos y consecuencias no presenta grandes diferencias respecto al que se realiza en los Estudios de Seguridad. Únicamente hay que precisar, que así como para los E.S. sólo es imprescindible la determinación

de las Zonas de Intervención (Z.I.) y de Alerta (Z.A.), para la realización de un A.C.R. es necesario determinar las **Zonas de Letalidad** al objeto de conocer las probabilidades de resultar letalmente afectado a causa del accidente para cada localización del entorno.

En Efecto, en los A.C.R. las consecuencias, es decir, los daños se consideran siempre como muertes, por lo que resulta imprescindible realizar el cálculo de las zonas de letalidad.

Para alcanzar un buen grado de definición resulta conveniente calcular al menos tres distancias de Letalidad. Los valores más usados a tal fin, dependiendo de las características del estudio, suelen ser las distancias del 1%, 50%, 90% y 99% de Letalidad.

3. DETERMINACION DE LAS PROBABILIDADES

En este capítulo se describen las técnicas usadas para calcular las probabilidades de ocurrencia de accidente y las subsecuentes probabilidades de que se den unas determinadas consecuencias.

Básicamente existen dos métodos para estimar las probabilidades de ocurrencia de accidentes:

- En base a datos históricos de accidentes. Este método resulta apropiado siempre que existan datos suficientes y relevantes sobre el accidente de interés.
- Cuando no existan datos históricos, se usan las técnicas de modelización en función de datos más básicos. Estas técnicas son principalmente el Arbol de Fallos y el Arbol de Sucesos.

Existen otras técnicas complementarias a éstas, como son el Análisis del fallo por

causa-común, Análisis del error humano y Análisis de sucesos externos. La Figura I.2 muestra

el esquema básico de utilización de todas estas técnicas.

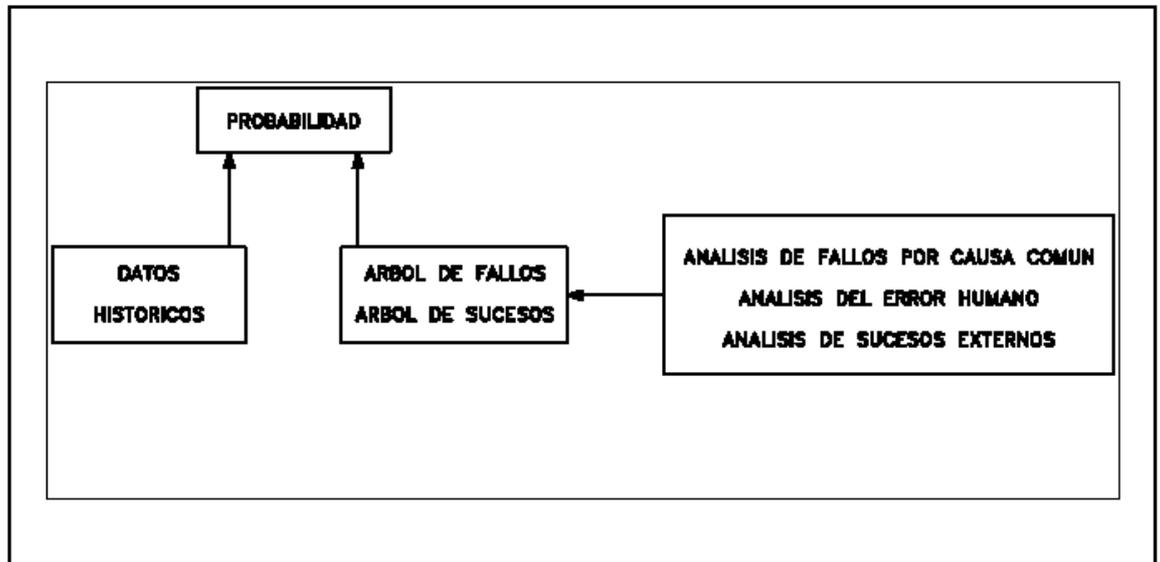


FIGURA I.2: ESQUEMA DE DETERMINACION DE PROBABILIDADES

3.1 PROBABILIDAD EN BASE A DATOS HISTÓRICOS

Son muchos los casos en los que las probabilidades de accidentes se pueden obtener en base a datos históricos. Este es un método directo que proporciona la probabilidad del suceso principal sin necesidad de una detallada modelización. No obstante, se deben satisfacer ciertos criterios para que el resultado sea significativo: suficiente número de datos, exactitud de los mismos y aplicabilidad de éstos a nuestro caso concreto.

La metodología de obtención de probabilidades en base a datos históricos comprende las siguientes etapas:

1. Definición del contexto. Tras la etapa de identificación de accidentes se debe llegar a una clara especificación de los accidentes para los que es necesario determinar su probabilidad.
2. Revisión de las fuentes de datos. Las bases de datos usadas deben ser completas e independientes, el período de estudio debe ser significativo y el número de datos referidos a nuestro accidente lo suficientemente amplio.
3. Comprobación de la aplicabilidad de los datos. Dado que los registros históricos recogen datos de grandes períodos de tiempo, es necesario comprobar que la aplicabilidad de nuestros datos sigue siendo válida a pesar de po-

sibles cambios en la tecnología, el diseño o la escala de la planta. En cualquier caso, si no resulta posible cumplir todos los requisitos, es preciso utilizar los mejores datos disponibles, siendo conocedor de las aproximaciones realizadas.

4. Cálculo de la probabilidad. La probabilidad de ocurrencia se puede calcular dividiendo el número de accidentes por la población expuesta. Por ejemplo, si hay doce fugas en tanques refrigerados de propano, de un total de 4.800 tanques/año, la probabilidad de fuga estimada será de $2,5 \cdot 10^{-3}$ fugas/tanques-año.

5. Validación. Siempre que sea posible se debe comparar el valor usado con datos diferentes de los usados para la estimación de probabilidades.

3.2 PROBABILIDAD EN BASE A MODELIZACIÓN

Básicamente existen dos técnicas para la modelización de probabilidades de accidentes y de sus desenlaces: los Árboles de Fallos se usan para estimar la probabilidad de ocurrencia de un accidente (rotura total de una tubería, sobrellenado de un tanque, etc.), los Árboles de Sucesos se utilizan para determinar la distribución de probabilidades de los posibles desenlaces (explosión, flash-fire, incendio en charco, etc.).

6.2.1 Arbol de Fallo

El método del Arbol de Fallo nos permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un accidente en base a la modelización de los mecanismos de fallo de un sistema.

El método consiste en el uso de una combinación de puertas lógicas (Puertas AND y OR) para representar un modelo de fallo. La probabilidad del suceso principal se calcula en base a datos de fallo de sucesos más simples.

Los objetivos de la realización de un Arbol de Fallos pueden ser diversos:

- Estimación de las probabilidades de ocurrencia de un accidente.
- Determinación de la combinación de sucesos que conduce a un accidente.
- Identificación de las medidas correctoras que reducen el riesgo de manera más significativa.

Es importante señalar que el proceso de definición de la instalación debe ser muy detallado para la realización de un Arbol de Fallos, y por otro lado el elevado consumo de tiempo que requiere su realización debe limitar su uso sólo a los accidentes más complejos y de mayor relevancia para el A.C.R.

6.2.2 Arbol de Sucesos

El método del Arbol de Sucesos nos permite identificar y cuantificar los posibles sucesos desencadenados tras un suceso iniciador. El árbol de sucesos proporciona una visión de la secuencia temporal de propagación de sucesos y puede aplicarse tanto al "preaccidente" (es decir, acciones del sistema de salvaguardia, reacciones del sistema, intervenciones del operador, etc) como al "postaccidente" (es decir, las posibles consecuencias: fuego, explosión, dispersión, etc).

Todo suceso iniciador, al que se le ha determinado su probabilidad de ocurrencia en base a datos históricos o al método del árbol de fallos, necesita posteriormente de la cuantificación de probabilidades de ocurrencia de cada uno de los sucesos subsecuentes a este, que se realiza mediante el árbol de sucesos.

A continuación se desarrolla sólo como ejemplo, no de forma exhaustiva, el árbol de sucesos (postaccidental) correspondiente a una fuga de gran magnitud de un tanque a presión de LPG.

Los sucesos contemplados para este ejemplo según la secuencia temporal de ocurrencia son:

- A Fuga de LPG de gran magnitud.
- B Ignición inmediata.
- C Dirección del viento hacia población.
- D Ignición retardada.
- E Explosión de vapores (UVCE).
- F Tanque alcanzado por el jet.

Para cada uno de estos sucesos se determinar sus probabilidades de ocurrencia tal y como se muestra en la Tabla I.1.

TABLA I.1

PROBABILIDADES DE LOS DIFERENTES SUCESOS

SUCESO	PROBABILIDAD	ORIGEN DEL DATO
A Fuga de LPG de gran magnitud	$1 \cdot 10^{-4}$ /año	Arbol de fallos
B Ignición inmediata	0.1	Juicio experto
C Dirección del viento hacia población	0.15	Datos meteorológicos
D Ignición retardada	0.9	Juicio experto
E Explosión de vapores (UVCE)	0.5	Datos históricos
F Tanque alcanzado por el jet	0.2	Geometría del sistema

A continuación se desarrolla y evalúa el árbol de sucesos correspondiente, en la Figura I.3.

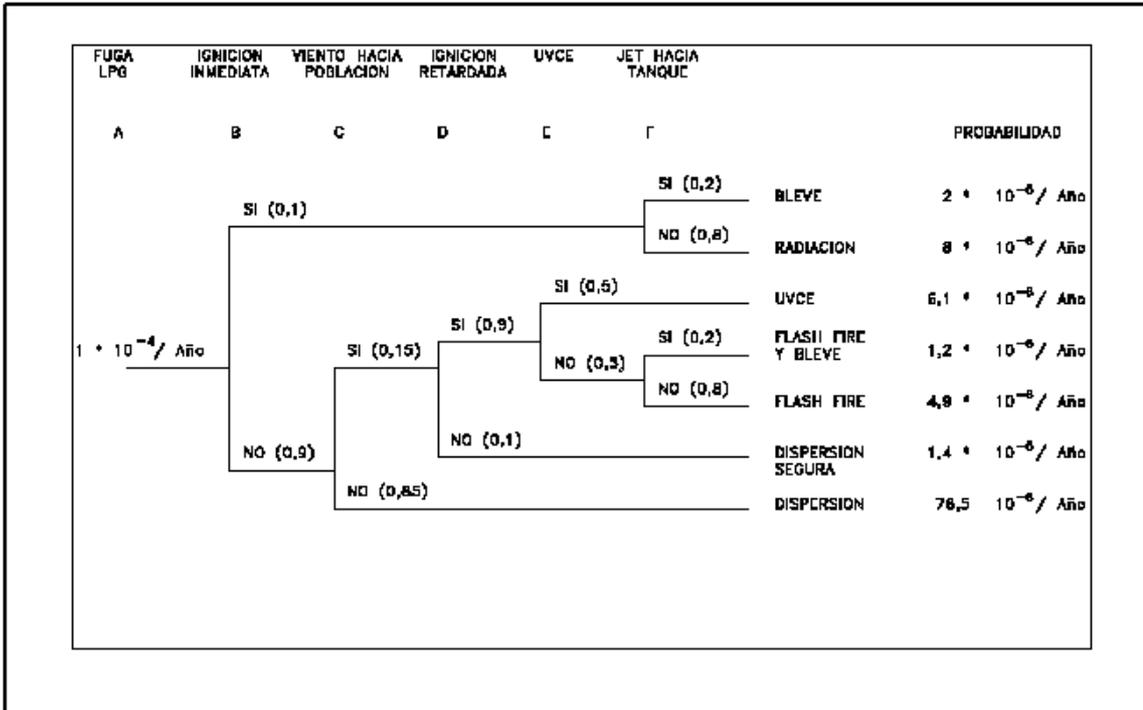


FIGURA I.3: ARBOL DE SUCESOS. ACCIDENTE CON LPG

4. DETERMINACION DEL RIESGO

La determinación del riesgo es la última fase en la realización de un A.C.R. y en la que se obtienen los resultados cuantitativos necesarios para la posterior evaluación del riesgo generado por la actividad, así como para la toma de decisiones.

No obstante, antes de pasar a calcularlo es necesario decidir acerca de qué **medidas del riesgo** y qué **formatos de presentación** nos interesan más o son necesarios para nuestro estudio.

4.1 DIFERENTES MEDIDAS DEL RIESGO

Aquí se comentan las tres formas más usadas para combinar probabilidad con magnitud de consecuencias: **índices de riesgo** (que recogen mediante un sólo valor o en forma de tabla el parámetro correspondiente), **riesgo individual** (que considera el riesgo de un individuo que puede estar en cualquier localización del entorno) y **riesgo de grupo** (que considera el riesgo sobre las poblaciones que se encuentran en las zonas de vulnerabilidad).

- Índices de riesgo.

A continuación se describen los más usados:

- . Proporción de accidentes letales (Fatal Accident Rate-FAR). Es el valor estimado de letalidades que se produciría por 108 horas de exposición.

- . Índice de peligro individual (Individual Hazard Index-IHI). Es similar al FAR para un riesgo particular y con un tiempo de exposición igual al que una persona está expuesta a este peligro.

- . Proporción media de muertes. Es el número medio de letalidades que se puede esperar de todos los posibles accidentes por unidad de tiempo.

Índice de coste social equivalente. Es una modificación de la proporción media de muertes que toma en cuenta además la aversión social a los accidentes.

- . Riesgo Individual.

En términos generales se puede definir como el riesgo a que está sometida una persona situada en los alrededores de una actividad peligrosa. Más explícitamente, el riesgo individual se define como la probabilidad por año de que una persona situada en una determinada localización del entorno de un actividad resulte letalmente afecta-

da por cualquier accidente en la citada actividad. Proporciona el valor del riesgo para cada localización del entorno, no tomando en consideración la presencia de personas ya que **sólo depende de la localización** respecto de la actividad industrial.

. Riesgo de Grupo.

El riesgo de grupo representa la probabilidad acumulada de que se produzca un número mínimo de letalidades simultáneas en los alrededores. Toma en consideración la presencia de personas en los alrededores, sin embargo, al integrar las consecuencias para todas las posiciones, no proporciona información sobre el riesgo en las diferentes localizaciones del entorno.

Ambas representaciones del riesgo, el riesgo individual y el riesgo de grupo, resultan complementarias, proporcionando por un lado una visión espacial del mismo y por otro una visión global. Estas dos medidas del riesgo pueden ser de importancia en la evaluación de medidas de reducción del riesgo o en la aceptación del riesgo generado por una actividad industrial.

4.2 PRESENTACIONES DEL RIESGO

El gran número de datos acerca de probabilidades y consecuencias que genera un A.C.R. debe ser integrado en una presentación que sea relativamente fácil de comprender y usar. La forma de presentación puede variar dependiendo del objetivo del A.C.R. y de la medida de riesgo elegida.

FORMAS DE PRESENTACION DEL RIESGO

MEDIDA DEL RIESGO	FORMATO DE PRESENTACION	USOS
RIESGO INDIVIDUAL Contorno de riesgo individual Perfil de riesgo individual Riesgo individual máximo	Representación de las curvas de isorriesgo individual sobre un mapa local. Representación en una gráfica del riesgo individual en función de la distancia desde la planta para una dirección determinada Valor numérico correspondiente a la persona situada en la localización con un riesgo individual más elevado.	Asegurar cumplimiento de límites impuestos. Identificación de zonas especialmente afectadas. Evaluación de medidas correctoras. Asegurar cumplimiento de límites impuestos. Evaluación de medidas correctoras Asegurar cumplimiento de límites impuestos.
RIESGO DE GRUPO Curva de riesgo de grupo (Curva F-N) Riesgo de grupo promedio	Representación en una gráfica de la probabilidad acumulada de sucesos o que puedan causar N o más letalidades frente a este número de letalidades. Valor numérico que promedia la tasa de mortalidad.	Asegurar cumplimiento de límites impuestos al riesgo de grupo. Mostrar la contribución de diferentes accidentes al riesgo representado.

4.3 DETERMINACIÓN DEL RIESGO

4.3.1 Riesgo individual

Para el cálculo del riesgo individual en una determinada localización en los alrededores de la actividad se asume que la contribución de todos los posibles accidentes es aditiva. Es decir, el riesgo individual total en cada punto es igual a la suma del riesgo individual, en este punto, generado por cada accidente asociado a la planta.

$$R.I_{x,y} = \sum_{A=1}^r R.I_{x,y,A}$$

Donde:

$R.I_{x,y}$: El riesgo individual total en la localización x,y .

$R.I_{x,y,A}$: El riesgo individual generado por el desarrollo de accidente A en la localización x,y .

r : El número total de desarrollos de accidentes considerados en el análisis.

La determinación de $R.I_{x,y,A}$ para cada accidente responde a la fórmula siguiente, donde se determina cual es la probabilidad de que una persona situada en la localización x,y resulte letalmente afectada debido al accidente A .

$$R.I_{x,y,A} = \left(\sum_{M=1}^s \left(\sum_{D=1}^t P_A * P_M * P_D * P_{L_{x,y,A}} \right) \right)$$

Donde:

P_A : Probabilidad de ocurrencia del desarrollo de accidente A .

P_M : Probabilidad de que se den cada una de las condiciones meteorológicas estudiadas (estabilidad, velocidad de viento, etc) y que determinan la magnitud de los efectos.

P_D : Probabilidad de ocurrencia de las direcciones de viento.

$P_{L,x,y,A}$: Probabilidad de sufrir daños letales en la localización x,y debido al desarrollo de accidente A para la condición meteorológica y dirección de viento en cuestión.

El cálculo del Riesgo Individual total para cada una de las localizaciones del entorno proporciona los resultados necesarios para la construcción de las curvas de isoriesgo y/o el perfil de riesgo individual.

A continuación en las Figuras I.4 y I.5 se muestran ejemplos de curvas de isoriesgo individual y un perfil de riesgo individual correspondiente a la dirección marcada en el plano.

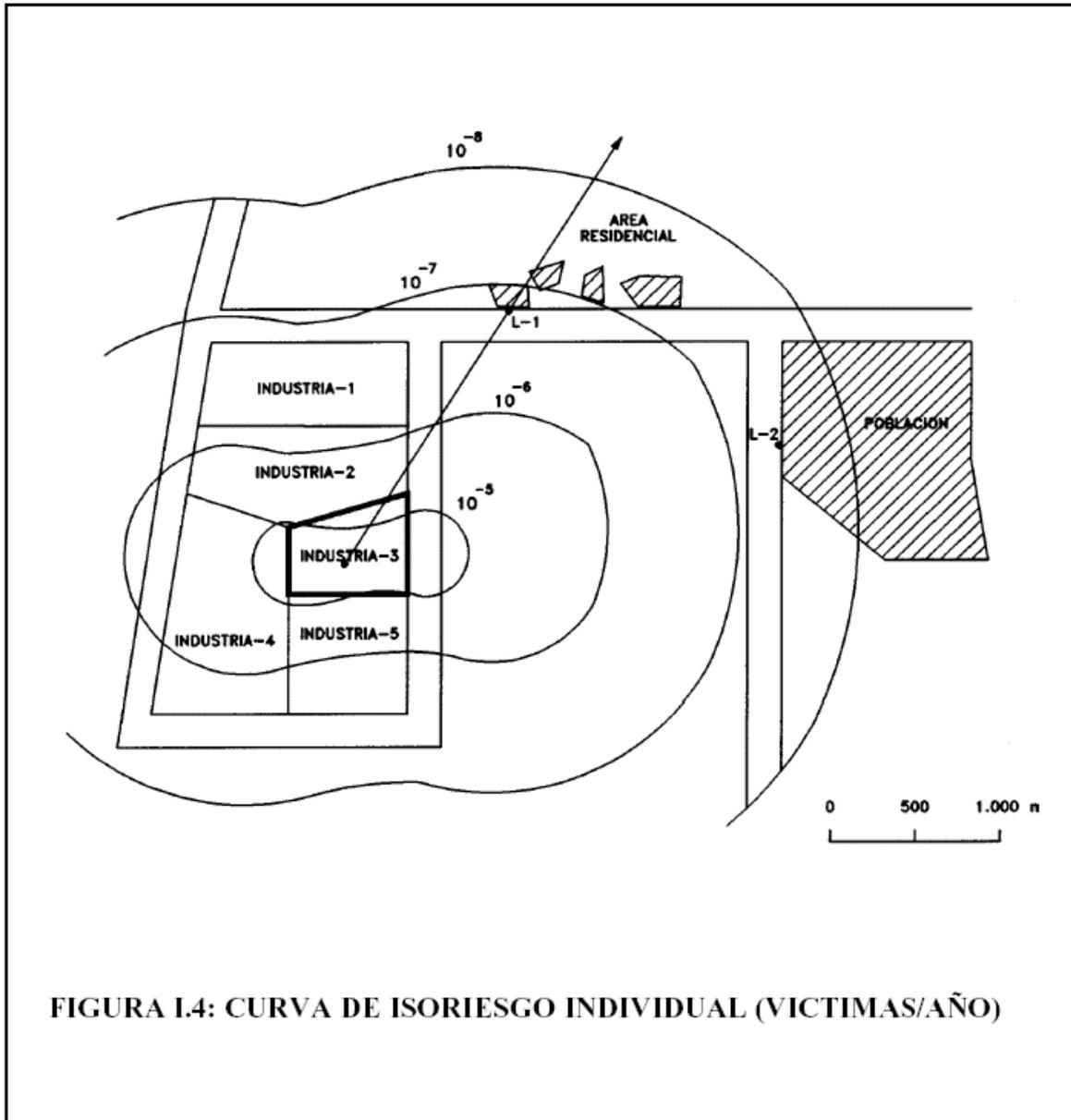
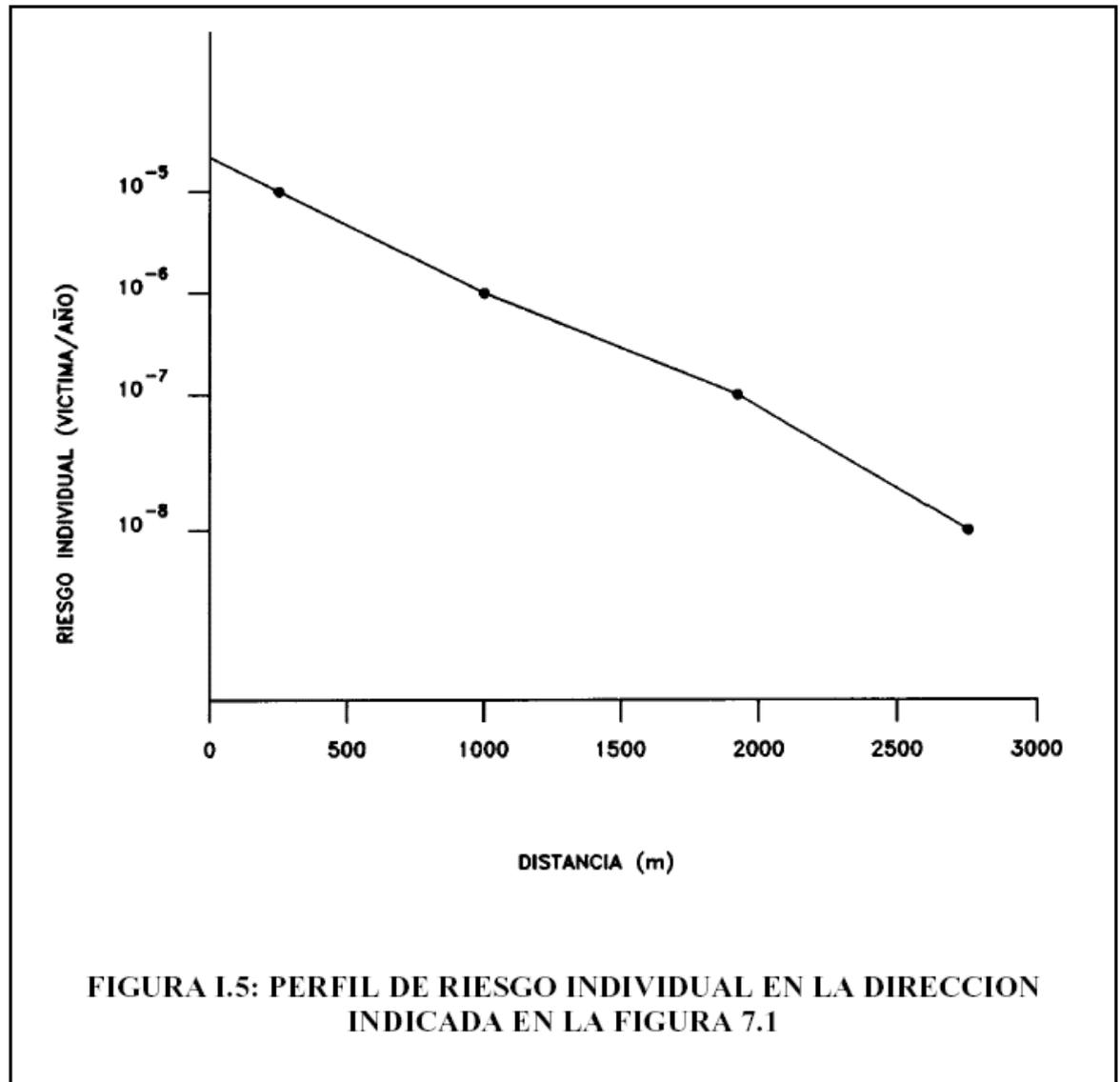


FIGURA I.4: CURVA DE ISORIESGO INDIVIDUAL (VICTIMAS/AÑO)



7.3.2 Riesgo de grupo

Para el cálculo del riesgo de grupo es necesario añadir a la información requerida para la determinación de riesgo individual, la información referente a la distribución poblacional en los alrededores. La determinación de la curva F-N requiere del siguiente procedimiento:

- Determinación del número de personas afectadas por cada desarrollo de accidente y su probabilidad

$$N_A = \sum_{x,y} P_{x,y} * P_{L_{x,y,A}}$$

Donde:

N_A: Número de letalidades resultantes del desarrollo de accidente A.

P_{x,y}: Número de personas presentes en la localización x,y.

P_{L_{x,y,A}}: Probabilidad de sufrir daños letales en la localización x,y debido al desarrollo de accidente A.

De esta forma se determina el número de personas letalmente afectadas por cada uno de los desarrollos accidentales, a cada uno de los cuales les corresponde una probabilidad de ocurrencia.

- Determinación de la probabilidad acumulada de accidentes que afectan a N ó más personas

$$F_N = \sum_A F_A \text{ (Para todos los desarrollos de accidente tales que } N_A \geq N \text{)}$$

Donde:

F_N: Frecuencia de todos los desarrollos de accidentes que afectan a N ó mas personas.

F_A: Frecuencia del desarrollo de accidente A.

N_A: Número de letalidades resultantes de desarrollo de accidente A.

El resultado obtenido es un conjunto de parejas de valores N frente a FN que posteriormente se grafican, generalmente sobre ejes logarítmicos.

A continuación, la Tabla 7.2 y la Figura 7.3 muestran ejemplos de la tabulación previa de datos y una presentación en la gráfica F-N. La presentación en la gráfica F-N se puede realizar de forma separada para los diferentes tipos de actividades, equipos, operaciones, etc. que forman la industria de modo que permite una rápida visualización de las diferentes contribuciones al riesgo.

TABLA I.3
EJEMPLO DE TABULACION DE DATOS
 (Se corresponde con la curva representada en la Figura 2.2)

Número de letalidades (N)	2	3	6	25	55
Probabilidad de accidentes con N letalidades (1/año) (*1)	$9,5 * 10^{-7}$	$4,1 * 10^{-7}$	$7,4 * 10^{-8}$	$5 * 10^{-8}$	$1,6 * 10^{-8}$
Probabilidad de accidentes con mas de N letalidades (1/año)	$1,5 * 10^{-6}$	$5,5 * 10^{-7}$	$1,4 * 10^{-7}$	$6,6 * 10^{-8}$	$1,6 * 10^{-8}$

(*1) Es la suma de las probabilidades de todos los accidentes que provocan N letalidades

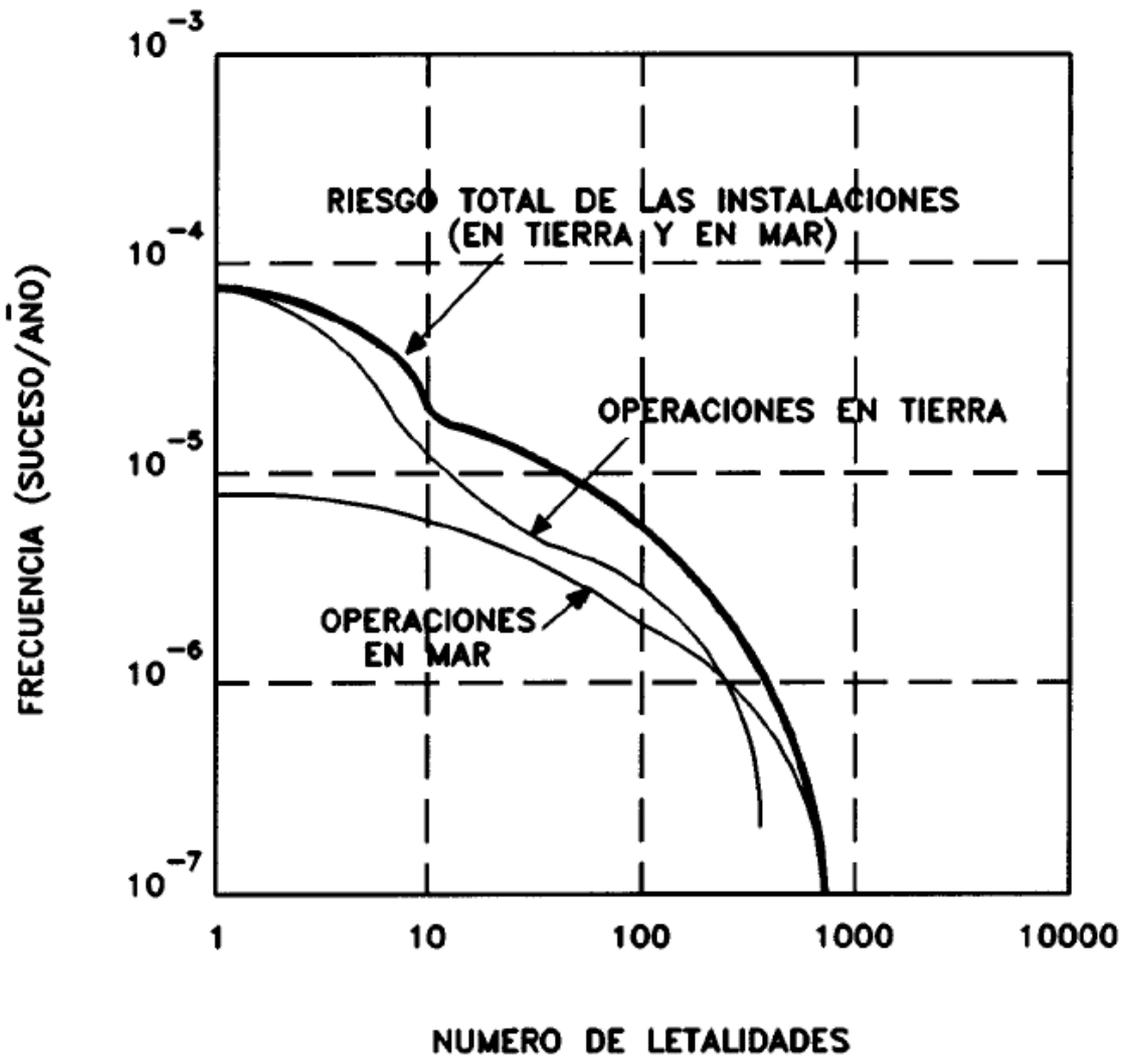


FIGURA I.6: EJEMPLO DE CURVA F-N