



APUNTES DE RIESGO QUÍMICO

Luis Antonio García Villanueva
Daniel Alfonso Reséndiz García
Santiago Banda Santamaría

Para una correcta visualización
del libro te sugerimos

Acrobat Reader
Haz Click

APUNTES DE RIESGO QUÍMICO
GARCÍA VILLANUEVA, Luis Antonio
RESÉNDIZ GARCÍA, Daniel Alfonso
BANDA SANTAMARÍA, Santiago
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
2026, 61 págs.
ISBN: 978-607-642-974-7

APUNTES DE RIESGO QUÍMICO

Primera edición electrónica
de un ejemplar (10 MB) en formato PDF
Publicado en línea: junio de 2026

D.R. © 2026, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Avenida Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de
México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán,
Ciudad de México, C.P. 04510

ISBN: 978-607-642-974-7

FACULTAD DE INGENIERÍA
<http://www.ingenieria.unam.mx/>

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad
Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción o
transmisión total o parcial por cualquier medio sin la autorización
escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México.

UNIDAD DE APOYO EDITORIAL
Cuidado de la edición: Patricia Eugenia García Naranjo
Formación editorial : Nismet Díaz Ferro

Fotos de portada: generadas con IA, Freepik

CONTENIDO

Glosario.....	IV
Índice de figuras.....	V
Índice de tablas.....	V
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1. Fundamentos de riesgo químico.....	1
1.2. Accidentes químicos.....	15
1.3. Organismos en seguridad y protección ambiental.....	18
1.4. Normativa y legislación en materia de riesgo químico.....	20
2. FACTORES DE RIESGO QUÍMICO.....	24
2.1. Riesgo químico-tecnológico.....	24
2.2. Accidentes de origen antropogénico.....	25
2.3. Accidentes de origen natural.....	26
2.3.1. Geológico.....	27
2.3.2. Hidrometeorológico.....	28
3. TIPOS DE ACCIDENTES.....	30
3.1. Fuego.....	30
3.1.1. Tipos de fuego.....	33
3.2. Explosiones.....	34
3.3. Nubes Tóxicas.....	36
3.4. Contaminación derivada de accidentes químicos.....	36
4. ESTUDIO DE RIESGOS.....	38
4.1. Identificación de peligros.....	39
4.2. Análisis de riesgos.....	40
4.3. Metodologías de análisis de riesgos.....	40
¿What if? (¿Qué pasa sí?).....	41
Análisis de Peligros y Operabilidad o Hazard and Operability Analysis (HazOp).....	42
Análisis por Árbol de Fallas o Fault Tree Analysis (FTA).....	43
Análisis por Árbol de Eventos o Event Tree Analysis (ETA).....	44
Análisis por Modos de Falla y sus Efectos o Failure Mode and Effect Analysis (FMEA).....	45
Análisis por Capas de Protección o Layer of Protection Analysis (LOPA).....	46
4.4. Análisis de consecuencias.....	47
Simulación de accidentes.....	47
Estimación de daños.....	50
5. INFRAESTRUCTURA Y EQUIPO DE PROTECCIÓN.....	52
6. CONCLUSIONES.....	54
7. BIBLIOHEMEROGRAFÍA.....	56

GLOSARIO

Concepto	Definición
ALOHA	Areal Locations of Hazardous Atmospheres o Ubicación de Zonas con Atmósferas Peligrosas
API	American Petroleum Institute o Instituto Americano del Petróleo
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry o Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion o Explosión de Vapor de Líquido en Ebullición
CAS	Chemical Abstracts Service o Servicio de Resúmenes Químicos
DOT	Department of Transportation o Departamento de Transporte
ERPG	Emergency Response Planning Guidelines
GHS	Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals
HAZMAT	Hazardous Materials
ILO	International Labour Organization
NFPA	National Fire Protection Association
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NOM	Norma Oficial Mexicana
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (EE.UU.)
STEL	Short-Term Exposure Limit
TWA	Time-Weighted Average
UFL	Upper Flammable Limit
USEPA	United States Environmental Protection Agency o Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

1

2

3

4

5

6

7

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Pictograma clase 1.....	6
Figura 1.2. Carteles clase 1.....	6
Figura 1.3. Pictogramas clase 2.....	7
Figura 1.4. Carteles clase 2.....	7
Figura 1.5. Pictograma clase 3.....	8
Figura 1.6. Carteles clase 3.....	8
Figura 1.7. Pictograma clase 4.....	10
Figura 1.8. Carteles clase 4.....	10
Figura 1.9. Pictograma clase 5.....	11
Figura 1.10. Carteles clase 5.....	11
Figura 1.11. Pictograma clase 6.....	12
Figura 1.12. Carteles clase 6.....	12
Figura 1.13. Pictogramas clase 7.....	13
Figura 1.14. Carteles clase 7.....	13
Figura 1.15. Pictograma clase 8.....	14
Figura 1.16. Carteles clase 8.....	14
Figura 1.17. Pictograma clase 9.....	15
Figura 1.18. Carteles clase 9.....	15
Figura 1.19. Chorros de fuego desde esferas de gas licuado del petróleo (CENAPRED, 2019).....	16
Figura 1.20. Instalación abandonada de Union Carbide, (CENAPRED, 2019).....	16
Figura 1.21. Consecuencias de explosión en Calle/Av.Guadalajara (CENAPRED, 2020).....	17
Figura 1.22. Trabajos de limpieza derrame Exxon Valdez, (Rodríguez, 2014).....	17
Figura 1.23. Animales sacrificados en Seveso, Italia (Ecologistas en Acción, 2016).....	18
Figura 4.1. Formato general para análisis ¿What if?.....	41
Figura 4.2. Formato general para análisis HazOp.....	42
Figura 4.3. Estructura general de Análisis por Árbol de Eventos, Elaboración propia.....	43
Figura 4.4. Estructura general de Análisis por Árbol de Fallas. Elaboración propia.....	45
Figura 4.5. Formato general para estudio de Análisis por Modos de Falla y sus Efectos.....	45

Figura 4.6. Ejemplo de radios de afectación de radiación térmica mediante el uso del software ALOHA... 50

Figura 5.1. Extintor portátil.....	53
Figura 5.2. Extintor móvil.....	53
Figura 5.3. Hidrante.....	53
Figura 5.4. Monitor.....	53
Figura 5.5. Aspensor.....	53
Figura 5.6. Sistema de aspensores.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 1.....	6
Tabla 1.2. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 2.....	7
Tabla 1.3. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 3.....	8
Tabla 1.4. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 4.....	9
Tabla 1.5. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 5.....	11
Tabla 1.6. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 6.....	12
Tabla 1.7. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 7.....	13
Tabla 1.8. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 8.....	14
Tabla 1.9. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 9.....	15
Tabla 1.10. Leyes relacionadas con riesgo químico.....	21
Tabla 1.11. Normas relacionadas con riesgo químico.....	22
Tabla 4.1. Elementos básicos del árbol de fallas.....	43

1 ANTECEDENTES

1.1. FUNDAMENTOS DE RIESGO QUÍMICO

En esta sección, se busca dar una introducción de conceptos básicos relacionados con el riesgo químico. Es común que los términos riesgo y peligro sean usados indistintamente o percibidos como sinónimos, así como también peligro y amenaza. Aunque existe una relación entre ellos, cada uno tiene un significado particular que es indispensable identificar y diferenciar. Las definiciones siguientes se presentan en un orden específico con la intención de mostrar su interrelación y secuencia.

De manera general, el *peligro* se refiere a una fuente o circunstancia con la capacidad de provocar daños a individuos, bienes o al medio ambiente. Considerando el manejo de sustancias químicas, particularmente sustancias peligrosas dentro de procesos industriales, la NOM-018-STPS-2015 (STPS, 2015) define al *peligro* como “*la capacidad intrínseca de las propiedades y características físicas, químicas o de toxicidad de una sustancia química peligrosa o mezcla para generar un daño al trabajador o en el centro de trabajo*”.

Una *amenaza*, es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que puede causar la pérdida de vidas, lesiones, daños a la propiedad, interrupción de actividades sociales y económicas o degradación ambiental, puede ser de origen natural o antropogénico.

De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, s.f.), una *amenaza* se define como “*peligro latente que representa la probable manifestación de un fenómeno físico de origen natural, socio-natural o antropogénico que se anticipa,*

puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura y los bienes y servicios. Es un factor de riesgo físico externo a un elemento o grupo de elementos sociales expuestos, que se expresa como la probabilidad de que un fenómeno se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y dentro de un periodo de tiempo definido.”

Como se mencionó previamente, se puede notar una similitud entre el significado de *peligro* y *amenaza*, sin embargo, un peligro puede no ser una amenaza si no se tiene exposición, entendiéndose como exposición el nivel de contacto de un individuo, población o sistema con alguna fuente de peligro.

Aunado a la exposición de un *peligro*, haciendo esto una *amenaza*, el concepto de *vulnerabilidad* es indispensable, entendiéndose como la incapacidad de un individuo, grupo o sistema para resistir, adaptarse o recuperarse de las consecuencias perjudiciales de un *peligro*. Dentro de la *vulnerabilidad*, puede haber grupos o sectores más susceptibles que otros.

La variación en los niveles de *vulnerabilidad* en seres humanos está en función de la edad, condiciones físicas y el estado de salud. Las medidas que pueden implementarse para disminuir los niveles de *vulnerabilidad* son el uso adecuado de equipo de protección personal (EPP), capacitación adecuada y revisiones médicas periódicas.

En infraestructura, los *niveles de vulnerabilidad* estarán en función del tipo de material y el estado en el que se encuentre. Como medidas para disminuir la *vulnerabilidad* se tienen diseños adecuados, mantenimientos e intervenciones periódicas.

Una vez descritos los conceptos de *peligro*, *amenaza* y *vulnerabilidad* surge el concepto de *riesgo*, el cual, de forma general es una medida o magnitud que está en función de la probabilidad de que un evento no deseado ocurra, así como de la magnitud de sus consecuencias. Es importante resaltar que los niveles de *riesgo* dependen de la frecuencia o probabilidad y gravedad o magnitud de las consecuencias de un evento.

De acuerdo con la NOM-018-STPS-2015 (STPS, 2015) se define el riesgo como “la probabilidad de que los efectos nocivos de una sustancia química peligrosa o mezcla por una exposición crónica o aguda de los trabajadores altere su salud o, por su capacidad de arder, explotar, corroer, entre otras, dañe el centro de trabajo”.

Considerando la definición anterior, es posible identificar que se toma en cuenta tanto la probabilidad como la capacidad de provocar daños, ya sea a seres humanos o al centro de trabajo. Asimismo, se incluye el término *exposición*, dentro del cual se tienen dos tipos, la *exposición crónica* y la *exposición aguda*.

La *exposición crónica* se refiere al contacto con algún agente tóxico o nocivo, normalmente en concentraciones o magnitudes bajas durante periodos de tiempo prolongados. Se pueden presentar efectos como irritaciones o malestares leves sin la capacidad de inhabilitar al trabajador expuesto, las consecuencias se observan a largo plazo.

Por otro lado, una *exposición aguda*, normalmente con concentraciones elevadas y periodos de tiempo corto, tiene la capacidad de provocar lesiones moderadas a graves e incluso la muerte si no se interviene de forma oportuna, los efectos se observan de forma inmediata.

Complementando lo anterior, se tienen los conceptos de *accidente* e *incidente* y *desastre* y *emergencia*, los cuales también son utilizados comúnmente sin diferenciarlos. De forma general, se puede hacer uso de estos por igual. Sin embargo, en el tema central del presente documento la diferenciación de conceptos es fundamental para su correcta aplicación.

Un *evento no deseado* puede categorizarse como *accidente* o *incidente*, teniendo un origen y desarrollo similar. Su diferenciación radica en que un *incidente* no genera grandes afectaciones, para su intervención se implementan medidas de control, limpieza y remediación para poder continuar con las actividades.

1

2

3

4

5

6

7

3

En el caso de un *accidente*, las consecuencias son mayores como lesionados y decesos en el personal. En cuanto a la infraestructura se pueden presentar daños importantes que requieran intervenciones como reforzamientos o reemplazo de los elementos dañados.

La *emergencia* se define como un evento no deseado, en donde pueden presentarse consecuencias en trabajadores, infraestructura y medio ambiente, sin embargo, el agente o sistema responsable cuenta con la capacidad de respuesta para intervenir y responder a dicho evento.

En contraparte, un *evento no deseado* será un *desastre* cuando el sistema o agente responsable no cuenta con la capacidad de respuesta adecuada y su intervención no sea suficiente, por lo que se tendrá la necesidad de contar con el apoyo de agentes externos gubernamentales como cuerpos de bomberos, protección civil y paramédicos u organismos privados especializados en la intervención de diferentes tipos de situaciones.

Por lo tanto, en una *emergencia* y *desastre* se tiene un origen común que es un *evento no deseado* con sus consecuencias asociadas, la diferencia radica en contar o no con la capacidad de respuesta e intervención ante dicho evento.

Con lo anterior, es posible observar que los conceptos abordados están ligados mutuamente, sin embargo, son conceptos distintos y es necesario diferenciarlos y utilizarlos de forma correcta.

En la actualidad, se han observado incrementos en la demanda de productos y servicios por parte de la población mundial, por lo que el sector industrial ha intensificado sus esfuerzos de forma paralela para satisfacer las necesidades existentes. Dentro de los insumos y materiales que se utilizan para llevar a cabo estas acciones están las sustancias químicas, dentro de las cuales se tienen materiales y sustancias peligrosas.

De acuerdo con lo descrito en la NOM-018-STPS-2015 (STPS, 2015), las *sustancias o mezclas químicas peligrosas* se definen como “*aquellas que por sus propiedades físicas, químicas y características toxicológicas presentan peligros físicos para las instalaciones, maquinaria y equipo, y para la salud de las personas que se encuentren en el centro de trabajo*”.

Estas sustancias poseen peligros por su composición y naturaleza, teniendo la capacidad de provocar daños. Asimismo, durante los procesos productivos son sometidas a condiciones extremas como presión, temperatura, almacenamiento de grandes volúmenes, transporte y trasvases. Las características de las sustancias peligrosas en combinación con las condiciones de los procesos industriales incrementan los niveles de riesgo.

De acuerdo con la Guía de Respuesta en Caso de Emergencia (GRE) desarrollada conjuntamente por organismos de Canadá, Estados Unidos de América y México (Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT] et al., 2024), se tienen las categorías de materiales peligrosos como se muestra de la Tabla 1.1 a la Tabla 1.9.

CLASE 1

Los materiales explosivos son sustancias o mezclas que pueden reaccionar rápidamente liberando gas, calor y presión de manera súbita. Se utilizan principalmente en la industria minera y de construcción, donde se requieren para actividades de voladura controlada, excavaciones profundas o demolición de estructuras. Por ejemplo, el nitrato de amonio con fuel oil (ANFO) es ampliamente usado en minería a cielo abierto. También se emplean en la fabricación de fuegos artificiales, cargas pirotécnicas para asientos eyectables en aeronaves y dispositivos militares. Estas sustancias requieren un manejo estricto por su alta sensibilidad a impactos, fricción o calor. En la Tabla 1.1 se muestran las subdivisiones, pictogramas y carteles asociados a la clase 1 de materiales peligrosos.

Tabla 1.1. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 1

Clase	División	Definición
1- Explosivos	División 1.1	Explosivos que presentan un riesgo de explosión en masa.
	División 1.2	Explosivos que presentan un riesgo de proyección sin riesgo de explosión en masa.
	División 1.3	Explosivos que presentan un riesgo de incendio y un riesgo menor de explosión o un riesgo menor de proyección, o ambos, pero no un riesgo de explosión en masa.
	División 1.4	Explosivos que no presentan riesgo apreciable considerable.
	División 1.5	Explosivos muy insensibles que no presentan un riesgo de explosión en masa.
	División 1.6	Artículos sumamente insensibles que no presentan riesgo de explosión en masa.



Figura 1.1. Pictograma clase 1



Figura 1.2. Carteles clase 1

Ejemplos de materiales clase 1: Trinitrotolueno (TNT), nitroglicerina, pólvora negra.

Industrias:

- » Militar y defensa
- » Minería (voladuras)
- » Construcción de túneles y presas
- » Industria pirotécnica

Ingenierías relacionadas:

- » Ingeniería de minas
- » Ingeniería civil
- » Ingeniería química
- » Ingeniería militar

CLASE 2

Los gases peligrosos pueden estar comprimidos, licuados, disueltos o refrigerados criogénicamente, y se subdividen en inflamables, no inflamables/no tóxicos y tóxicos. En la industria, los gases inflamables como el acetileno y el propano se usan para soldadura y corte de metales, mientras que el oxígeno es esencial en hospitales, metalurgia y tratamiento de aguas. El cloro gaseoso, un gas tóxico, se emplea en plantas de tratamiento de agua para desinfección. También se utilizan en refrigeración industrial (como el amoníaco) y en la industria alimentaria para atmósferas controladas. Su almacenamiento y transporte involucra cilindros de alta presión o tanques criogénicos. En la Tabla 1.2 se muestran las subdivisiones, pictogramas y carteles asociados a la clase 2 de materiales peligrosos.

Tabla 1.2. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 2

Clase	División	Definición
2- Gases	División 2.1	Gases inflamables
	División 2.2	Gases no-inflamables, no tóxicos
	División 2.3	Gases tóxicos



Figura 1.3. Pictograma clase 2



Figura 1.4. Carteles clase 2

Ejemplos de materiales clase 2: Cloro, propano, helio.

Industrias:

- » Petroquímica (gases combustibles)
- » Tratamiento de agua (cloración)
- » Alimentos (atmósfera modificada con CO₂ y N₂)
- » Salud (oxígeno médico, helio para resonancia magnética)

Ingenierías relacionadas:

- » Ingeniería química
- » Ingeniería ambiental
- » Ingeniería mecánica
- » Ingeniería en alimentos
- » Bioingeniería

CLASE 3

Incluye sustancias con punto de inflamación inferior a 60 °C como gasolina, etanol, acetona, tolueno o benceno. Su aplicación es generalizada en refinerías, estaciones de servicio, fábricas de pinturas, disolventes, cosméticos y laboratorios. Por ejemplo, la gasolina es vital para el transporte terrestre, marítimo y aéreo, mientras que el etanol se utiliza como biocombustible o materia prima en productos farmacéuticos. Estas sustancias son altamente volátiles y pueden generar vapores explosivos en presencia de fuentes de ignición. En la Tabla 1.3 se muestran las subdivisiones, pictogramas y carteles asociados a la clase 3 de materiales peligrosos.

Tabla 1.3. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 3


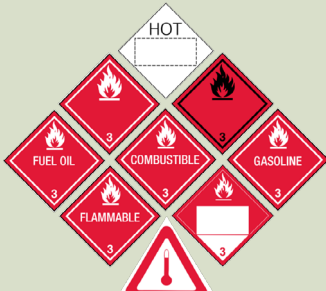
Clase	
3 - Líquidos inflamables	
	

Figura 1.5. Pictograma clase 3

Figura 1.6. Carteles clase 3

Ejemplos de materiales clase 3: Gasolina, etanol, acetona.

Industrias:

- » Refinación y distribución de combustibles
- » Pinturas y recubrimientos
- » Cosméticos
- » Farmacéutica

Ingenierías relacionadas:

- » Ingeniería petroquímica
- » Ingeniería industrial
- » Ingeniería química
- » Ingeniería en materiales

CLASE 4

Esta clase comprende materiales como fósforo blanco, magnesio, sodio metálico y carburo de calcio. En la industria pirotécnica y metalúrgica, el magnesio se usa en aleaciones ligeras y bengalas, mientras que el sodio y el litio se emplean en baterías industriales. Algunas sustancias reaccionan violentamente con el agua o la humedad, liberando gases inflamables. Otras, como el carbón activado húmedo, pueden arder espontáneamente durante su almacenamiento si no se controla la temperatura y ventilación. En la Tabla 1.4 se muestran las subdivisiones, pictogramas y carteles asociados a la clase 4 de materiales peligrosos.

Tabla 1.4. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 4

Clase	División	Definición
4 - Sólidos inflamables: sustancias que pueden experimentar combustión espontánea; sustancias que, en contacto con el agua desprenden gases inflamables	División 4.1	Sólidos inflamables, sustancias de reacción espontánea y sólidos explosivos insensibilizados
	División 4.2	Sustancias que pueden experimentar combustión espontánea
	División 4.3	Sustancias que, en contacto con el agua, desprenden gases inflamables



Figura 1.7. Pictograma clase 4



Figura 1.8. Carteles clase 4

Ejemplos de materiales clase 4: Azufre, fósforo rojo, magnesio.

Industrias:

- » Pirotecnia
- » Metalurgia
- » Fabricación de municiones
- » Agricultura

Ingenierías relacionadas:

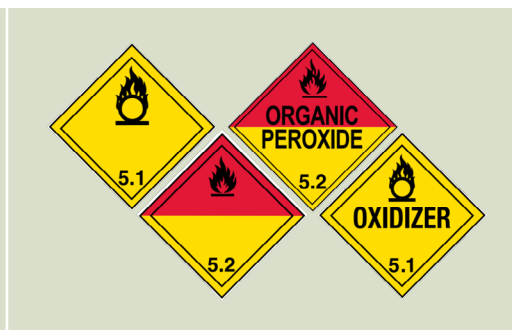
- » Ingeniería química
- » Ingeniería de materiales
- » Ingeniería industrial
- » Ingeniería agronómica

CLASE 5

Las sustancias de la división 5.1 no son combustibles por sí mismas, pero favorecen la combustión, como el nitrato de amonio que se utiliza como fertilizante o en explosivos. Se usan en procesos de oxidación química, fabricación de explosivos, curtido de pieles y producción de papel. Los peróxidos orgánicos (división 5.2), altamente reactivos, se emplean como iniciadores de polimerización en la industria del plástico, pero son térmicamente inestables, sensibles al calor, fricción o contaminación.

Tabla 1.5. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 5

Clase	División	Definición
5 - Sustancias Oxidantes y Peróxidos Orgánicos	División 5.1	Sustancias oxidantes
	División 5.2	Peróxidos orgánicos

**Figura 1.9.** Pictograma clase 5**Figura 1.10.** Carteles clase 5

Ejemplos de materiales clase 5: Peróxido de hidrógeno, nitrato de amonio.

Industrias:

- » Producción de fertilizantes
- » Desinfección industrial
- » Procesos de blanqueo (textil, papel)
- » Laboratorios químicos

Ingenierías relacionadas:

- » Ingeniería química
- » Ingeniería agrícola
- » Ingeniería ambiental

CLASE 6

Los productos tóxicos (6.1) como arsénico, cianuro o pesticidas organofosforados se usan en la industria química, agrícola y farmacéutica y representan un grave riesgo en caso de inhalación, ingestión o contacto. Las sustancias infecciosas (6.2) incluyen material biológico contaminado, como sangre, virus o bacterias patógenas, y se generan en hospitales, laboratorios clínicos o centros de investigación biomédica. Estas últimas requieren transporte especializado (por ejemplo, triple embalaje) y cumplimiento de protocolos sanitarios estrictos. En la Tabla 1.6 se muestran las subdivisiones, pictogramas y carteles asociados a la clase 6 de materiales peligrosos.

Tabla 1.6. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 6

Clase	División	Definición
6 - Sustancias Tóxicas y Sustancias Infecciosas	División 6.1	Sustancias tóxicas
	División 6.2	Sustancias infecciosas

**Figura 1.11.** Pictograma clase 6**Figura 1.12.** Carteles clase 6

Ejemplos de materiales clase 6: Cianuro de sodio, mercurio, ántrax.

Industrias:

- » Minería del oro (cianuración)
- » Industria eléctrica (lámparas de mercurio)
- » Biotecnología
- » Manejo hospitalario de residuos infecciosos

Ingenierías relacionadas:

- » Ingeniería ambiental
- » Ingeniería biomédica
- » Ingeniería en biotecnología
- » Ingeniería sanitaria

CLASE 7

Estos materiales emiten radiación ionizante (alfa, beta, gamma, neutrónica), y su manejo ocurre principalmente en medicina nuclear, radioterapia, diagnóstico por imágenes (como gammacámaras o PET-CT), así como en la industria energética nuclear y radiografía industrial. Isótopos como el cobalto-60 o el cesio-137 son utilizados para esterilización de equipos médicos o control de calidad mediante gammagrafía industrial. También tienen aplicaciones en detectores de humo o en investigaciones científicas. Su transporte y almacenamiento está estrictamente regulado por normas nacionales e internacionales.

Tabla 1.7. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 7

Clase	
7 - Materiales radiactivos	
 	

Figura 1.13. Pictograma clase 7**Figura 1.13.** Carteles clase 7

Ejemplos de materiales clase 7: Uranio, cesio-137, cobalto-60.

Industrias:

- » Generación de energía nuclear
- » Medicina nuclear (radioterapia, diagnóstico)
- » Radiografía industrial
- » Investigación científica

Ingenierías relacionadas:

- » Ingeniería nuclear
- » Ingeniería en física
- » Ingeniería biomédica
- » Ingeniería eléctrica
- » Ingeniería en energía

CLASE 8

En esta categoría se encuentran sustancias que destruyen tejidos vivos o materiales por acción química, como ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, hidróxido de sodio (soda cáustica). Se utilizan ampliamente en refinerías, tratamiento de aguas, limpieza industrial, galvanoplastia y fabricación de productos químicos. Por ejemplo, el ácido sulfúrico es esencial en la producción de fertilizantes, baterías automotrices y refinación de metales. Estas sustancias requieren materiales de contención especiales (acero inoxidable, plástico de alta resistencia, entre otros) y protocolos de seguridad para evitar contacto dérmico o inhalación de vapores.

Tabla 1.8. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 8

Clase	
8 - Sustancias corrosivas	
	

Figura 1.15. Pictograma clase 8

Figura 1.16. Carteles clase 8

Ejemplos de materiales clase 8: Ácido sulfúrico, hidróxido de sodio.

Industrias:

- » Limpieza industrial
- » Tratamiento de aguas
- » Fabricación de baterías
- » Procesamiento químico

Ingenierías relacionadas:

- » Ingeniería química
- » Ingeniería de procesos
- » Ingeniería ambiental

CLASE 9

Las sustancias de esta división presentan peligros diversos no cubiertos por otras clases, como materiales contaminantes marinos, baterías de litio, residuos peligrosos, sustancias con asfixia química (nitrógeno líquido). Las baterías de ion-litio, utilizadas en dispositivos electrónicos, autos eléctricos o drones, pueden generar incendios si se dañan. Algunos materiales poliméricos o espumas en grandes cantidades también pueden representar riesgos de incendio o toxicidad al quemarse. Esta clase también incluye mercancías con peligro ambiental, reguladas por convenios como el MARPOL para evitar la contaminación marina.

Tabla 1.9. Divisiones, carteles, pictogramas de materiales peligrosos Clase 9



Clase	
9 - Sustancias y objetos peligrosos varios, incluidas las sustancias peligrosas para el medio ambiente	
	

Figura 1.17. Pictograma clase 9**Figura 1.18.** Carteles clase 9

Ejemplos de materiales clase 9: Asbesto, baterías de litio, bifenilos policlorados.

Industrias:

- » Electrónica (litio)
- » Automotriz
- » Construcción (asbesto en materiales antiguos)
- » Agricultura (plaguicidas)

Ingenierías relacionadas:

- » Ingeniería ambiental
- » Ingeniería electrónica
- » Ingeniería civil
- » Ingeniería agronómica

1.2. ACCIDENTES QUÍMICOS

A lo largo de la historia, diversos accidentes químicos han dejado una huella imborrable en la humanidad, evidenciando las consecuencias devastadoras que pueden surgir por la falta de conocimiento, negligencia, una mala regulación y la insuficiente preparación ante emergencias industriales. Estos eventos han marcado un antes y después para el desarrollo de normativas más estrictas y sistemas de gestión de riesgos más robustos. A continuación, se presentan algunos ejemplos de

accidentes históricos a nivel mundial que han sido devastadores, por lo que su estudio ha sido ampliamente desarrollado con el fin de identificar y aprender sus causas.

Explosiones de San Juan Ixhuatepec (México, 1984)

El 19 de noviembre de 1984, una serie de explosiones tipo BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*) ocurrieron en una planta de almacenamiento de gas licuado de petróleo de PEMEX, en San Juan Ixhuatepec, Estado de México. El desastre tuvo como resultado 500 muertes y aproximadamente 2,000 heridos, asimismo, la evacuación de más de 10,000 personas y daños significativos en un radio de un kilómetro. Este incidente es considerado uno de los peores accidentes industriales relacionados con gas licuado de petróleo en la historia.



Figura 1.19. Chorros de fuego desde esferas de gas licuado del petróleo (CENAPRED, 2019)

Desastre de Bhopal (India, 1984)

El 3 de diciembre de 1984, una fuga de gas isocianato de metilo en una planta de pesticidas de Union Carbide en Bhopal expuso a más de 500,000 personas a la inhalación de gases tóxicos. Las estimaciones de muertes varían, con cifras que van desde 3,787 hasta más de 16,000. También, más de medio millón de personas sufrieron lesiones, muchas de ellas permanentes. Este desastre es ampliamente considerado como el peor accidente industrial del mundo.

Figura 1.20. Instalación abandonada de Union Carbide, (CENAPRED, 2019)

1

2

3

4

5

6

7

Explosiones de Guadalajara (México, 1992)

El 22 de abril de 1992, una serie de explosiones en el sistema de alcantarillado del barrio de Analco en Guadalajara, Jalisco, causaron la muerte de al menos 212 personas y heridas a más de 1,800. Las explosiones destruyeron ocho kilómetros de calles y afectaron a más de 1,100 viviendas. Investigaciones posteriores atribuyeron el desastre a filtraciones de gasolina en el sistema de drenaje.

Figura 1.21. Consecuencias de explosión en Calle/Av. Guadalajara (CENAPRED, 2020)



Derrame de petróleo del Exxon Valdez (EE. UU., 1989)

El 24 de marzo de 1989, el barco petrolero Exxon Valdez encalló en el arrecife Bligh en el Prince William Sound de Alaska, derramando aproximadamente 11 millones de galones de petróleo crudo. Este desastre ambiental afectó más de 1,300 millas de costa y causó la muerte de cientos de miles de aves marinas, mamíferos marinos y peces. Las consecuencias ecológicas y económicas fueron devastadoras y persistieron durante décadas.

Figura 1.22. Trabajos de limpieza derrame Exxon Valdez, (Rodríguez, 2014)



1

2

3

4

5

6

7

Desastre de Seveso (Italia, 1976)

El 10 de julio de 1976, una explosión en una planta química en Seveso, Italia liberó una nube de dioxina (TCDD), una de las sustancias más tóxicas conocidas. Aunque no se reportaron muertes inmediatas, el incidente causó graves problemas de salud a largo plazo y llevó a la evacuación de cientos de personas. Este desastre fue un factor determinante para la implementación de la Directiva Seveso.



Figura 1.23. Animales sacrificados en Seveso, Italia (Ecologistas en Acción, 2016)

1.3. ORGANISMOS EN SEGURIDAD Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

Los accidentes químicos descritos anteriormente son eventos que han evidenciado la necesidad del desarrollo y fortalecimiento de normativas y organismos dedicados a garantizar la seguridad industrial y la protección ambiental. A nivel mundial, diversas instituciones y legislaciones han surgido con el objetivo de prevenir incidentes similares y mitigar sus impactos.

A continuación, se presentan algunos de los principales organismos y directivas que han marcado pauta en este ámbito.

American Institute of Chemical Engineers (AIChE)

El AIChE, a través del *Center for Chemical Process Safety* (CCPS), ha establecido estándares y directrices fundamentales para la gestión de la seguridad en procesos químicos. Su enfoque en la seguridad basada en riesgos proporciona un marco integral para identificar, evaluar y mitigar peligros en instalaciones industriales. Estas prácticas buscan prevenir incidentes catastróficos mediante una cultura organizacional centrada en la seguridad y la mejora continua.

Directivas Seveso I, II y III (Unión Europea)

Tras el desastre de Seveso en 1976, la Unión Europea implementó una serie de directivas conocidas como Seveso I (1982), Seveso II (1996) y Seveso III (2012). Estas legislaciones establecen requisitos estrictos para la prevención y control de accidentes mayores relacionados con sustancias peligrosas. La evolución de estas directivas ha incorporado mejoras en la clasificación de sustancias, umbrales de notificación y mecanismos de respuesta ante emergencias.

American Petroleum Institute (API)

El API ha desarrollado más de 800 estándares que abarcan diversos aspectos de la industria del petróleo y gas, incluyendo la seguridad operativa y la protección ambiental. Estos estándares, reconocidos a nivel mundial, proporcionan lineamientos para la gestión de riesgos, integridad mecánica y prácticas seguras en operaciones industriales.

Environmental Protection Agency (EPA)

La EPA de Estados Unidos es responsable de la regulación y supervisión de sustancias químicas para proteger la salud humana y el medio ambiente. A través de leyes como el *Toxic Substances Control Act* (TSCA, por sus siglas en inglés), la agencia evalúa y gestiona los riesgos asociados con productos químicos industriales, estableciendo normativas para su producción, uso y disposición.

Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA)

En México, la ASEA es el organismo encargado de regular y supervisar la seguridad industrial y la protección ambiental en el sector de hidrocarburos. Establecida en 2014, la agencia desarrolla normativas y realiza inspecciones para garantizar que las actividades relacionadas con petróleo y gas se realicen de manera segura y sostenible.

1.4. NORMATIVA Y LEGISLACIÓN EN MATERIA DE RIESGO QUÍMICO

La creciente industrialización, el transporte masivo de sustancias peligrosas y el uso cotidiano de productos químicos en distintos sectores productivos han elevado la necesidad de establecer marcos legales y normativos que garanticen una gestión adecuada del riesgo químico. En México, este enfoque ha sido abordado desde distintas áreas: salud ocupacional, protección ambiental, seguridad industrial y protección civil.

La legislación mexicana vigente establece obligaciones tanto para el sector público como para el privado, con el propósito de prevenir incidentes, mitigar sus impactos y fortalecer la capacidad de respuesta ante emergencias tecnológicas.

MARCO LEGAL NACIONAL

México cuenta con un entramado legal que, aunque disperso, abarca los principales aspectos del riesgo químico. Las leyes más relevantes son:

1

2

3

4

5

6

7

Tabla 1.10. Leyes relacionadas con riesgo químico

Ley	Aplicación
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	Marco rector de la política ambiental: incluye prevención y control de contaminación en aire, agua y suelo, incluidos contaminantes químicos peligrosos, por lo que sustenta evaluaciones y planes de riesgo químico.
Ley General de Protección Civil	Integra la gestión de riesgos de desastres, incluidos incidentes con sustancias químicas peligrosas; obliga a identificar riesgos y establecer programas de prevención y respuesta a emergencias químicas.
Ley Federal del Trabajo	Regula condiciones de seguridad e higiene en el trabajo; exige evaluar y controlar la exposición a sustancias peligrosas, articulando la gestión de riesgo químico ocupacional.
Ley General de Salud	Controla el manejo, transporte, almacenamiento y disposición de sustancias que representen riesgo a la salud humana; pilar sanitario para la gestión de riesgos químicos.
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	Regula la generación y manejo de residuos peligrosos (químicos tóxicos, inflamables, corrosivos, etc.); exige caracterización, etiquetado y medidas de control para evitar impactos y accidentes.
Ley de Hidrocarburos	Ordena la exploración, producción, transporte y almacenamiento de hidrocarburos; incorpora lineamientos de seguridad para prevenir accidentes mayores con sustancias inflamables o explosivas.

Fuente: (DOF, 1970, 1988, 2000, 2012, 2014, 2022)

NORMAS OFICIALES MEXICANAS (NOM)

Las Normas Oficiales Mexicanas son instrumentos técnicos obligatorios que detallan requisitos específicos para prevenir y controlar riesgos químicos. Algunas de las NOM más destacadas en esta materia incluyen:

Tabla 1.11. Normas relacionadas con riesgo químico

Norma	Aplicación
NOM-018-STPS-2015	Sistema armonizado para la identificación y comunicación de peligros por sustancias químicas (etiquetado y HDS); esencial para prevenir y gestionar riesgos químicos en centros de trabajo.
NOM002STPS2010	Establece condiciones de seguridad contra incendios, incluidas medidas para sustancias inflamables; clave para prevenir incidentes por químicos combustibles.
NOM005STPS1998	Requisitos de seguridad e higiene para manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas; controla la exposición y previene accidentes.
NOM028STPS2012	Sistema de administración de seguridad en procesos y equipos críticos que manejan sustancias químicas peligrosas; incluye análisis de consecuencias y medidas de mitigación.
NOM010STPS2014	Define límites máximos permisibles de exposición a agentes químicos en el ambiente laboral y medidas de control; pilar de la gestión del riesgo químico ocupacional.
NOM087SEMARNATSSA12002	Manejo y transporte de residuos peligrosos biológico-infecciosos, que pueden contener sustancias químicas; directrices para evitar liberaciones y exposiciones accidentales.

Norma	Aplicación
NOM052SEMARNAT2005	Características y procedimiento de identificación y clasificación de residuos peligrosos (tóxicos, inflamables, corrosivos, etc.); esencial en la gestión del riesgo químico de residuos.
NOM003SEGOB2011	Señalización de seguridad y salud en el trabajo; incluye señales específicas para áreas con sustancias peligrosas, facilitando la identificación rápida de riesgos químicos.
NOM-002-STPS-2010	Establece los requisitos mínimos de seguridad para la prevención y protección contra incendios en todos los centros de trabajo en México

Fuente: (DOF, 1998, 2002, 2005, 2010, 2011, 2012, 2014, 2015)

1

2

3

4

5

6

7

2.1. RIESGO QUÍMICO-TECNOLÓGICO

El riesgo químico-tecnológico se refiere a la posibilidad de que ocurran eventos adversos derivados de la interacción entre sustancias químicas peligrosas y procesos tecnológicos, los cuales pueden afectar la salud humana, el medio ambiente y la infraestructura. Estos riesgos emergen principalmente en entornos industriales donde se manipulan, almacenan o transportan productos químicos y pueden manifestarse como incendios, explosiones y nubes tóxicas.

¿Cómo surge? El riesgo químico es aquel asociado a la exposición no controlada con agentes químicos que pueden provocar efectos agudos o crónicos en la salud, así como daños al medio ambiente. Esta exposición puede ocurrir durante la fabricación, almacenamiento, transporte o uso de sustancias peligrosas, y se ve influenciada por factores como la concentración del agente, la duración de la exposición y las vías de ingreso al organismo (inhalación, ingestión o contacto dérmico).

Por su parte, el riesgo tecnológico se relaciona con fallos en sistemas o procesos industriales que, al interactuar con sustancias químicas, pueden desencadenar emergencias de gran magnitud. Estos riesgos son inherentes a la actividad humana y se consideran controlables mediante la implementación de medidas preventivas y correctivas adecuadas.

Los riesgos químico-tecnológicos pueden materializarse en diversas formas, incluyendo:

- **Explosiones:** Liberación súbita de energía que puede causar destrucción de infraestructuras y pérdida de vidas humanas.
- **Incendios:** Combustión no controlada de materiales inflamables, generando calor, humo y gases tóxicos.
- **Nubes tóxicas:** Liberación accidental de sustancias peligrosas al medio ambiente, afectando la salud de las personas y los ecosistemas.
- **Contaminación ambiental:** Presencia de agentes químicos en el aire, agua o suelo, con efectos adversos a corto o largo plazo.

2.2. ACCIDENTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO

Los accidentes químicos de origen antropogénico son aquellos provocados directa o indirectamente por acciones humanas, ya sea por negligencia, errores operativos, deficiencias en la gestión o fallos en la implementación de medidas de seguridad. Estos incidentes, a menudo evitables, destacan la importancia de una cultura de seguridad robusta y de la implementación de sistemas de gestión adecuados en entornos industriales.

Mantenimiento nulo o deficiente

El mantenimiento inadecuado o inexistente de equipos e infraestructuras industriales es una causa recurrente de accidentes químicos. La falta de inspecciones periódicas, la omisión de reparaciones necesarias y la utilización de equipos obsoletos pueden conducir a fallos catastróficos. Un ejemplo emblemático es la explosión de la refinería de Texas City en 2005, donde se identificaron múltiples deficiencias en el mantenimiento y en la gestión de la seguridad de los procesos, contribuyendo al desastre ocurrido.

Malas prácticas

Las malas prácticas operativas, como la manipulación incorrecta de sustancias químicas, el incumplimiento de procedimientos establecidos y la falta de formación adecuada del personal, incrementan significativamente el riesgo de accidentes. Estas prácticas pueden incluir el uso de productos químicos impuros, etiquetado incorrecto, almacenamiento inadecuado y violaciones de protocolos de seguridad.

1

Aspectos gerenciales/administrativos

La gestión y administración deficientes en las organizaciones industriales pueden ser factores determinantes en la ocurrencia de accidentes. La falta de liderazgo en seguridad, la priorización de la producción sobre la seguridad, la ausencia de políticas claras y la rotación frecuente de personal directivo pueden erosionar la cultura de seguridad y aumentar la probabilidad de incidentes.

2

3

Estudios de riesgo nulos, deficientes y no actualizados

La realización de estudios de riesgo es fundamental para identificar y mitigar peligros potenciales en entornos industriales. La ausencia de estos estudios, su ejecución deficiente o la falta de actualización periódica pueden dejar a las organizaciones vulnerables a incidentes. Es esencial que los análisis de riesgos sean exhaustivos, actualizados y que se integren en la toma de decisiones operativas y estratégicas.

4

5

2.3. ACCIDENTES DE ORIGEN NATURAL

Como posibles causas de accidentes, se tienen eventos de origen natural con la capacidad de desencadenar accidentes químico-tecnológicos. A estos fenómenos se les ha denominado Natech (*Natural Hazards Triggering Technological Accidents*)

6

7

(Krausmann et al., 2017; Showalter & Myers, 1994). Se consideran eventos de baja probabilidad, pero de muy alta consecuencia porque se ha evidenciado que afectan grandes extensiones del territorio, impactando la instalación industrial que procesa, almacena o transporta sustancias químicas peligrosas, así como líneas de suministro de servicios como gas, electricidad, agua o telecomunicaciones, poblaciones aledañas y el ambiente.

Bajo esta perspectiva, es importante mencionar que los impactos en las operaciones industriales y la infraestructura peligrosa suelen ser una característica recurrente, pero a menudo pasada por alto en muchas situaciones de desastre (Necci & Krausmann, 2022). En conclusión, es necesario empezar a tomar en cuenta este tipo de desastres a la hora de elaborar planes de gestión del peligro, donde se pueda asegurar el mínimo riesgo posible.

2.3.1. GEOLÓGICO

El riesgo geológico será cualquier circunstancia, proceso o efecto geológico que resulte dañino para las personas o bienes. Cuando esa situación obliga a la puesta en marcha de ayuda externa, se dice que se ha producido un desastre o una catástrofe, y se encuentra en función de la gravedad de las pérdidas que genere el evento. Entendiéndose que un desastre o catástrofe implica que existe una afectación severa a la comunidad o sociedad, que ocasiona un gran número de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales, superando la capacidad de la sociedad afectada para enfrentar la situación con sus propios recursos (Olcina y Ayala-Carcedo, 2002).

Se pueden realizar diversas clasificaciones de los tipos de riesgos geológicos, lo más común es agruparlos según su origen:

- *Riesgos geológicos internos o endógenos*, con origen en el interior de la Tierra: son los volcánicos y sísmicos.

- *Riesgos geológicos externos o exógenos*, con origen en la superficie terrestre o sus proximidades: movimientos de ladera, crecidas y avenidas, aludes de nieve, erosión de suelos, litorales y costeros, glaciares, periglaciares.
- *Riesgos geológicos litológicos*, asociados no a un proceso geodinámico, sino a la existencia de un tipo de roca y/o mineral concreto que condiciona un comportamiento determinado: kársticos, expansividad de arcillas, radiactividad natural, radón o minerales asbestiformes, y halocinesis o diapirismo, entre otros.

También se puede hablar de riesgos geológicos inducidos, que son los riesgos geológicos que, aunque tienen origen natural, pueden ser desencadenados por la acción humana, como puede ser subsidencia, ignición de turbas, sufusión o algunos movimientos de ladera.

2.3.2. HIDROMETEOROLÓGICO

El mundo cada vez se ve más afectado por eventos climáticos extremos, la identificación y gestión de riesgos hidrometeorológicos se ha vuelto crucial para la seguridad y bienestar de las comunidades e instalaciones industriales. Los **riesgos hidrometeorológicos** se refieren a la probabilidad de que ocurra un desastre causado por un fenómeno atmosférico relacionado con el agua. Dichos fenómenos pueden ser: *ciclones tropicales, inundaciones, tornados, tormentas eléctricas, sequías, lluvias torrenciales, nevadas y granizadas*. El que se presente uno de estos eventos no implica necesariamente un desastre, debe existir una condición de *vulnerabilidad*. Para esto, se deben presentar las condiciones del *espacio y tiempo el fenómeno atmosférico* y la *existencia de comunidades humanas o instalaciones* que puedan ser dañadas seriamente.

Por ejemplo, el riesgo es el producto de la combinación de estos dos factores, la causa y la falta de protección ante la misma. Por ejemplo, si se desborda un río, pero no hay ninguna instalación cercana, no hay desastre. Tampoco lo hay si la instalación tiene un muro de contención que la proteja de la inundación o el riesgo es mínimo.

Como ejemplo relevante se tiene el caso particular que ocurrió en la refinería “Salina Cruz Antonio Dovalí Jaime, PEMEX”, donde la tormenta tropical Calvin desató un incendio cerca del área de bombas, lo que obligó a detener las operaciones.

“Las inundaciones tuvieron como consecuencia el desbordamiento de presas de residuos y el derramamiento de aceite”, indicó Pemex. El producto derramado alcanzó un punto de ignición y desató el incendio, según las primeras conclusiones de la empresa. La refinería de Salina Cruz está ubicada en el estado sureño de Oaxaca, en la costa del Pacífico, y ocupa una superficie de 600 hectáreas. Los siete heridos estuvieron bajo atención médica, pero ninguno grave (DW, 2017).

1

2

3

4

5

6

7

El uso de sustancias químicas es fundamental en múltiples industrias y entornos de trabajo, desde la manufactura hasta la investigación científica. Sin embargo, su manejo inadecuado puede generar riesgos significativos que afectan tanto la seguridad de los trabajadores como la infraestructura y el medio ambiente.

Los accidentes químicos pueden producirse por diversas razones, como fallas en los protocolos de seguridad, almacenamiento incorrecto, falta de capacitación o reacciones imprevistas entre sustancias incompatibles. En muchos casos, estas situaciones pueden derivar en incendios, explosiones, exposiciones tóxicas y otros incidentes con consecuencias graves.

Para comprender mejor los efectos del riesgo químico y establecer medidas de prevención eficaces, es fundamental identificar los distintos tipos de accidentes que pueden presentarse en estos contextos. A continuación, se describen las principales formas en las que estos incidentes pueden manifestarse.

3.1. FUEGO

El fuego es una manifestación de la combustión que, bajo control, ha sido esencial para el desarrollo humano en actividades como la cocción de alimentos, la generación de energía y diversos procesos industriales. No obstante, cuando se presenta de manera descontrolada, el fuego puede ocasionar daños significativos a las personas, al medio ambiente y a la infraestructura.

En el contexto de los riesgos químicos, el fuego es una de las principales amenazas debido a la presencia de sustancias inflamables en entornos industriales y laborales. La interacción inadecuada de estas sustancias con fuentes de ignición puede desencadenar incendios con consecuencias graves.

Factores que contribuyen a incendios relacionados con sustancias químicas:

Sustancias inflamables: Materiales que pueden arder fácilmente al entrar en contacto con una fuente de ignición. Estos incluyen líquidos como solventes, gases como el propano, metano y combustibles sólidos, materiales ampliamente utilizados en la industria e incluso en sectores residenciales.

Fuentes de ignición: Elementos capaces de iniciar la combustión:

- Chispas provocadas por cortocircuitos en tableros eléctricos, paneles o cableado
- Superficies calientes como: vehículos, equipos y maquinaria
- Llamas abiertas: quemadores de gases y sopletes
- Electricidad estática
- Trabajos en caliente: corte y soldadura

Condiciones ambientales: Factores como la ventilación deficiente, altas temperaturas en los procesos o la presencia de oxidantes pueden aumentar la probabilidad de ocurrencia de un incendio o modificar su comportamiento y alcance. Además, la temperatura ambiental, dirección y velocidad del viento, humedad relativa, cobertura del cielo y radiación pueden modificar la estabilidad atmosférica, lo que a su vez genera variaciones en el comportamiento de nubes inflamables y/o explosivas.

1

2

3

4

5

6

7

Consecuencias de incendios descontrolados:

Daños a la salud humana: Las personas expuestas al fuego pueden sufrir quemaduras, intoxicaciones por inhalación de humos tóxicos o lesiones fatales.

Impacto ambiental: La liberación de sustancias químicas durante un incendio puede contaminar el aire, el agua y el suelo, afectando a los ecosistemas circundantes.

Pérdidas materiales: Los incendios pueden destruir instalaciones, maquinaria y productos, generando pérdidas económicas significativas.

Medidas preventivas:

- Almacenamiento adecuado: Guardar las sustancias inflamables en contenedores apropiados, etiquetados correctamente y en áreas designadas con ventilación adecuada.
- Control de fuentes de ignición: Implementar procedimientos para minimizar la generación de chispas, mantener equipos eléctricos en buen estado y utilizar herramientas antichispa cuando sea necesario.
- Capacitación del personal: Formar a los trabajadores en el manejo seguro de sustancias químicas, en el uso de equipos de protección personal y en procedimientos de respuesta ante emergencias.
- Equipos de extinción: Disponer de extintores adecuados al tipo de fuego potencial y asegurarse de que estén accesibles y en condiciones operativas óptimas.

La implementación rigurosa de estas medidas es esencial para prevenir incendios relacionados con sustancias químicas y mitigar sus posibles efectos adversos.

1

2

3

4

5

6

7

3.1.1. TIPOS DE FUEGO

El fuego puede manifestarse de diversas formas, cada una con características y riesgos específicos en función del tipo de sustancia, estado de agregación, cantidad y condiciones de almacenamiento. A continuación, se detallan las principales modalidades, incluyendo ejemplos ocurridos en México:

- **Chorros o dardos de fuego (*Jet Fires*):** Se producen cuando una fuga de gas a alta presión encuentra una fuente de ignición, generando una llama continua en forma de chorro o dardo. Este tipo de incendio es especialmente peligroso debido a la intensa radiación térmica y la posibilidad de provocar efectos en cadena en áreas cercanas. En instalaciones industriales, los chorros de fuego pueden alcanzar temperaturas superiores a los 1,300°C, comprometiendo la integridad del personal, estructuras y tuberías.
- **Charcos o alberca de fuego (*Pool Fires*):** Ocurren cuando un líquido inflamable se derrama, formando un charco que, al entrar en contacto con una fuente de ignición, se incendia. La extensión del fuego depende del área del derrame y de las propiedades del líquido involucrado. Estos incendios liberan calor y gases tóxicos al ambiente, lo que puede agravar la situación en áreas urbanas o industriales densamente pobladas.
- **Llamaradas (*Flash Fires*):** Se presentan cuando una nube de vapor inflamable se dispersa en el aire y se enciende rápidamente. Aunque la combustión es breve, puede cubrir áreas extensas, representando un riesgo significativo para personas e instalaciones. Estas llamaradas son difíciles de predecir, por lo que es crucial mantener sensores de detección de gases y sistemas de alerta temprana en instalaciones de riesgo.
- **Bolas de fuego (*Fireballs*):** Se generan cuando una gran cantidad de gas o vapor inflamable se libera y se enciende, formando una esfera de fuego intensa. Este fenómeno suele estar asociado a explosiones de tanques o recipientes a

1

2

3

4

5

6

7

presión. Las bolas de fuego producen daño térmico intenso a distancias significativas, lo cual representa un riesgo crítico en plantas industriales.

Como ejemplo en el caso particular de México, se tiene el desastre de San Juanico en 1984, considerado uno de los más trágicos en la historia. Una serie de explosiones e incendios a causa de fugas de gas licuado de petróleo (GLP) provocaron incendios masivos, incluyendo charcos de fuego, que tuvieron como resultado numerosas víctimas y destrucción de infraestructura.

3.2. EXPLOSIONES

Las explosiones son eventos violentos que implican la liberación súbita de energía, generando ondas expansivas y proyectiles que pueden causar daños significativos a personas, infraestructura y al medio ambiente. En el contexto de los riesgos químicos, las explosiones suelen derivarse de reacciones químicas descontroladas, manejo inadecuado de sustancias peligrosas o fallas en los sistemas de contención.

Tipos de explosiones en accidentes químicos:

- **Explosiones de nubes de vapor no confinadas (UVCE):** Ocurren cuando una sustancia inflamable, como un gas o vapor, se libera al ambiente y forma una nube que, al entrar en contacto con una fuente de ignición, detona en un espacio abierto. La gravedad de la explosión depende de la cantidad de sustancia liberada y las condiciones ambientales.
- **Explosiones de nubes de vapor confinadas (VCE):** Se producen cuando la mezcla inflamable se encuentra dentro de un espacio confinado, como tuberías, recipientes o edificaciones. La confinación aumenta la presión generada durante la combustión, resultando en una explosión más intensa y destructiva.

1

2

3

4

5

6

7

- **Explosiones por expansión de vapor de líquidos en ebullición (BLEVE):** Este tipo de explosión ocurre cuando un recipiente que contiene un líquido a alta presión es expuesto a una fuente de calor, debilitando su estructura y provocando la ruptura del contenedor. Esto causa la liberación súbita del contenido, que se vaporiza y puede inflamarse, generando una bola de fuego. Las BLEVES son especialmente comunes en tanques de gas licuado de petróleo, si no cuentan con válvulas de alivio adecuadas.
- **Explosiones de polvos:** Se presentan en entornos industriales donde materiales combustibles en forma de polvo, como granos, carbón o metales, se dispersan en el aire y entran en contacto con una fuente de ignición. La combustión rápida de estos polvos puede desencadenar explosiones devastadoras.

Efectos de las explosiones:

- **Ondas expansivas:** La liberación de energía genera ondas de presión que se propagan rápidamente, causando daños como rotura de ventanas, colapso de estructuras y lesiones en personas, incluyendo rotura de tímpanos y hemorragias internas. Asimismo, estas ondas pueden generar consecuencias negativas en otros recipientes, tuberías, equipos y maquinaria con efectos en cadena.
- **Proyectiles:** La explosión puede fragmentar materiales, convirtiéndolos en proyectiles que son lanzados a gran velocidad, representando un riesgo de impacto para personas y estructuras circundantes.

Para ejemplificar los riesgos de las explosiones y sus consecuencias, recordemos la serie de explosiones en el sistema de alcantarillado de Guadalajara, Jalisco, que causaron la muerte de aproximadamente 190 personas y dejó a miles sin hogar. Las explosiones fueron atribuidas a la acumulación de vapores inflamables en las alcantarillas, resultando en ondas expansivas que destruyeron calles y edificaciones.

1

2

3

4

5

6

7

3.3. NUBES TÓXICAS

En el ámbito de los riesgos químicos, una nube tóxica se define como la propagación en forma de gas o vapor de sustancias químicas peligrosas, originada por un escape accidental. Estas nubes pueden desplazarse a grandes distancias, dependiendo de factores como la densidad del gas, las condiciones meteorológicas y la topografía del terreno, representando un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente. En eventos documentados en México, como en las instalaciones industriales de Coatzacoalcos o Tula, las nubes tóxicas han provocado evacuaciones masivas y afectaciones respiratorias graves en la población.

La exposición a una nube tóxica puede provocar efectos agudos, como irritación de las vías respiratorias, náuseas, vómitos y, en casos graves, asfixia o colapso del sistema nervioso central. Asimismo, las exposiciones prolongadas o repetidas pueden causar daños crónicos en órganos vitales, incluyendo el hígado, los riñones y los pulmones.

3.4. CONTAMINACIÓN DERIVADA DE ACCIDENTES QUÍMICOS

Los accidentes químicos representan una fuente significativa de contaminación ambiental, con efectos adversos tanto inmediatos como a largo plazo sobre la salud humana y los ecosistemas. Estos incidentes pueden incluir fugas, derrames, incendios o explosiones que liberan sustancias peligrosas al medio ambiente, la contaminación resultante puede afectar diversos componentes del entorno.

AGUA

Los derrames de sustancias químicas en ríos, lagos o acuíferos pueden comprometer la calidad del agua, afectando su uso para consumo humano, riego o recreación. También causan graves daños a la biodiversidad acuática y pueden generar restricciones prolongadas en el acceso al recurso (CONAGUA, 2020).

1

2

3

4

5

6

7

SUELO

Las sustancias químicas vertidas sobre el suelo alteran su composición y fertilidad, afectando los cultivos y representando riesgos para la salud humana a través de la cadena alimentaria. Además, pueden filtrarse hacia las aguas subterráneas, agravando la contaminación ambiental (EEA, 2019).

La rehabilitación de suelos contaminados por hidrocarburos puede tardar décadas y requiere técnicas especializadas como biorremediación o encapsulamiento, las cuales representan costos muy elevados (Volke Sepúlveda & Velasco Trejo, 2002).

AIRE

En los accidentes químicos, la liberación de gases o vapores tóxicos puede contaminar el aire, generando nubes tóxicas que se dispersan con el viento y afectan amplias zonas. Esta contaminación puede causar efectos respiratorios agudos y crónicos en la población expuesta, así como impactos en el medio ambiente atmosférico (OMS, 2016).

La Comisión Ambiental de la Megalópolis ha implementado sistemas de monitoreo atmosférico en zonas industriales, para detectar aumentos súbitos de compuestos peligrosos como el dióxido de azufre o amoníaco (Comisión Ambiental de la Megalópolis [CAME], 2025).

1

2

3

4

5

6

7

4

ESTUDIO DE RIESGOS

El estudio de riesgos es un instrumento clave para regular las actividades humanas con potencial catastrófico como el manejo de sustancias químicas.

La esencia de este estudio radica en la anticipación, por lo que no se limita solamente a identificar peligros, sino que también diseña escenarios preventivos. El estudio de riesgos es un enfoque que inicialmente puede demandar una gran inversión y diseños técnicos más robustos, sin embargo, a largo plazo resulta en una gran ventaja, ya que haber realizado un estudio de riesgos se traduce en la reducción de costos por emergencias o incluso en la gestión de procesos legales de proyectos industriales complejos.

El estudio de riesgos es un enfoque que integra metodologías cuantitativas y cualitativas para gestionar los riesgos de manera sostenible, estos enfoques consisten en determinar qué agentes químicos pueden ocasionar daños, como por ejemplo sustancias tóxicas, emisiones gaseosas o residuos peligrosos, también, a través de ellos se pueden evaluar las probabilidades de ocurrencia y las magnitudes de las consecuencias, haciendo uso de herramientas como los modelos, evaluaciones de exposición, análisis de vulnerabilidad de ecosistemas, entre otros.

Por ejemplo, para una planta de manejo y tratamiento de residuos peligrosos, un estudio de riesgos no sólo se centraría en la evaluación de los riesgos tóxicos propios de una planta de este tipo, sino que también evaluaría factores como la proximidad a zonas urbanas o comunidades, así como las posibles afectaciones geológicas o hidráulicas.

Es crucial entender cómo está dividido el estudio de riesgos y que cada etapa del proceso depende de las anteriores y afecta a las siguientes.

4.1. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

La identificación de peligros constituye la primera etapa fundamental en la gestión del riesgo químico y consiste en reconocer las sustancias químicas peligrosas presentes en un entorno laboral o experimental, así como las condiciones en las que podrían generar daño a la salud humana o al medio ambiente (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 2021). Este proceso implica analizar las propiedades intrínsecas de los agentes químicos, tales como su toxicidad, inflamabilidad, reactividad y potencial carcinogénico, entre otros factores de riesgo.

De acuerdo con el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA), los peligros pueden clasificarse en tres grandes categorías: físicos, para la salud y para el medio ambiente (Naciones Unidas, 2021). La evaluación inicial debe contemplar la revisión de fichas de datos de seguridad (FDS) u hojas de datos de seguridad (HDS), etiquetas de los productos y bases de datos reconocidas, como las proporcionadas por la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA) o la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, por sus siglas en inglés).

Es esencial considerar tanto las vías de exposición —inhalación, ingestión, contacto dérmico o penetración ocular— como las condiciones operativas que pueden agravar el riesgo, tales como el almacenamiento inadecuado, la manipulación deficiente o la falta de ventilación adecuada (OSHA, 2020). Asimismo, la identificación no debe limitarse a productos químicos puros, sino extenderse a mezclas, subproductos, residuos y cualquier sustancia que pueda generarse como resultado de procesos industriales o reacciones no controladas.

Por tanto, la identificación rigurosa de los peligros químicos no sólo permite cumplir con los marcos regulatorios vigentes, sino que constituye la base sobre la cual se desarrollan estrategias efectivas de control y prevención, contribuyendo de manera directa a la protección de la salud ocupacional y ambiental.

1

2

3

4

5

6

7

4.2. ANÁLISIS DE RIESGOS

El análisis de riesgos es un componente esencial en la gestión de la seguridad química, ya que permite evaluar la probabilidad y severidad de eventos no deseados derivados del manejo de sustancias peligrosas. Esta etapa se basa en la identificación previa de peligros y busca establecer las posibles consecuencias de una falla, incidente o accidente, así como los mecanismos que lo desencadenan de acuerdo con el Centro para la Seguridad de los Procesos Químicos o Center for Chemical Process Safety (CCPS, 2022).

Diversas metodologías han sido desarrolladas con el propósito de analizar los riesgos de manera sistemática, cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa. A continuación, se describen las más reconocidas y aplicadas internacionalmente.

4.3. METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS DE RIESGOS

Las metodologías de análisis de riesgos pueden clasificarse en función de su naturaleza exploratoria (cualitativa), evaluativa (semicuantitativa) o probabilística (cuantitativa). La selección de la técnica adecuada depende de factores como la complejidad del proceso, la disponibilidad de datos y el objetivo del análisis. Entre las más comunes se encuentran:

- ¿Qué pasa sí? o *What if?*
- Análisis de Peligros y Operabilidad o *Hazard and Operability Analysis* (HazOp)
- Análisis por Árbol de Fallas o *Fault Tree Analysis* (FTA)
- Análisis por Árbol de Eventos o *Event Tree Analysis* (ETA)
- Análisis por Modos de Falla y sus Efectos o *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)
- Análisis por Capas de Protección o *Layer of Protection Analysis* (LOPA)

1

2

3

4

5

6

7

WHAT IF? (¿QUÉ PASA SÍ?)

El análisis “What if?” es una técnica cualitativa basada en preguntas hipotéticas formuladas por un grupo multidisciplinario de expertos, considerando aspectos como la experiencia de trabajadores, normatividad aplicable y recomendaciones de fabricantes de equipos y maquinaria.

Consiste en identificar escenarios potenciales a partir de cuestionamientos del tipo: ¿Qué pasa si ocurre X? Esta metodología es útil en etapas tempranas de diseño o modificación de procesos, ya que permite explorar una amplia gama de posibles fallos de forma rápida y flexible (OSHA, 2016).

De manera general, un formato para el desarrollo de esta metodología se observa en la Figura 4.1, considerando el cuestionamiento inicial, sus consecuencias asociadas y recomendaciones. Del mismo modo, se puede tener una secuencia entre diferentes cuestionamientos tomando en cuenta que no se presenta una intervención oportuna.

Información de estudio ¿What if?			
Empresa/Dependencia/Institución:			
Planta/sección:		Fecha de realización:	
Sistema o punto en estudio:		Elaboró:	
Información complementaria:		Revisó:	
#	¿Qué pasa sí?	Consecuencias	Recomendaciones
1	Se presenta una fuga o derrame de una sustancia inflamable.	Presencia de atmósferas inflamables.	Contar con dispositivos de detección y planes de respuesta.
.	.	.	.
.	.	.	.
n	.	.	.

Figura 4. 1. Formato general para análisis What if?

1

2

3

4

5

6

7

ANÁLISIS DE PELIGROS Y OPERABILIDAD O HAZARD AND OPERABILITY ANALYSIS (HazOp)

El HazOp es una técnica sistemática y estructurada utilizada para identificar desviaciones en procesos químicos mediante el uso de palabras guías (“más”, “menos”, “no”, “parte de”, entre otras). Se aplica principalmente en sistemas continuos y complejos, como los de la industria petroquímica y se basa en la revisión minuciosa de diagramas de proceso por parte de un equipo interdisciplinario (European Process Safety Centre [EPSC], 2019). Es una de las metodologías más reconocidas por su eficacia en la identificación de riesgos operacionales. En la Figura 4.2 se observa un formato general para la aplicación de esta metodología.

Información de estudio HazOp				
Empresa/Dependencia/Institución:				
Planta/sección:			Fecha de realización:	
Sistema o punto en estudio:			Elaboró:	
Información complementaria:			Revisó:	
#	Escenario	Causas	Consecuencias	Recomendaciones
1	Liberación de gas generando nubes tóxicas e inflamables.	Incremento en la presión debido a fallas en el dispositivo de medición.	Atmósferas peligrosas para el personal expuesto.	Revisiones periódicas a los dispositivos de medición, así como mantenimiento.
.	.			
.	.	.	.	
n	.	.	.	

Figura 4.2. Formato general para análisis HazOp

1

2

3

4

5

6

7

ANÁLISIS POR ÁRBOL DE FALLAS O FAULT TREE ANALYSIS (FTA)

El análisis de árbol de fallas (FTA) es una técnica deductiva que parte de un evento no deseado (por ejemplo, una fuga tóxica) y analiza hacia atrás las combinaciones lógicas de fallas que podrían llevar a su ocurrencia. Se representa mediante diagramas jerárquicos que utilizan compuertas lógicas (AND, OR) para establecer relaciones causales. Es una herramienta valiosa para la evaluación cuantitativa de la confiabilidad de sistemas (CCPS, 2022). En la Figura 4.3 se observa la estructura general la metodología FTA y en la Tabla 4.1 se presentan los elementos mayormente utilizados.

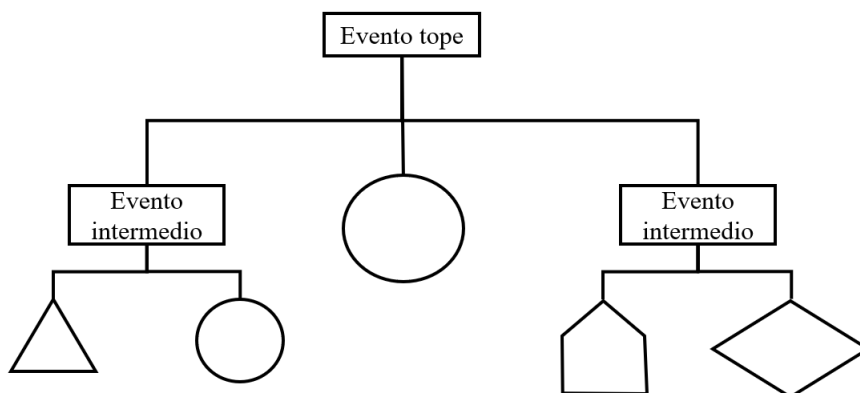






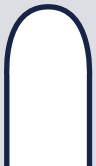


Figura 4.3. Estructura general de Análisis por Árbol de Eventos, Elaboración propia

Tabla 4.1. Elementos básicos del árbol de fallas

Elemento	Definición
	Sucesos intermedios: se presentan de la combinación de dos o más eventos a través de compuertas lógicas.
	Sucesos básicos: eventos en la parte inferior del árbol, no requieren desarrollo posterior.

	Sucesos no desarrollados: no presentan un desarrollo posterior, ya sea por falta de información o por considerarse innecesario.
	Suceso externo: evento externo que puede intervenir en el sistema analizado.
	Elemento de transferencia: se agrega un identificador para realizar una explicación más detallada en otra sección.
	La compuerta lógica “o” u “or”: se utiliza para mostrar los posibles eventos que pueden ocurrir para que se presente el evento superior.
	Compuerta lógica “y” o “and”: se utiliza para relacionar dos o más elementos que deben ocurrir para que se presente el evento superior.

1

2

3

4

ANÁLISIS POR ÁRBOL DE EVENTOS O EVENT TREE ANALYSIS (ETA)

A diferencia del FTA, el análisis de árbol de eventos (ETA) es una técnica inductiva que parte de un evento iniciador y explora hacia adelante las posibles trayectorias de evolución del sistema, incluyendo fallos de barreras de seguridad. Es especialmente útil para estimar consecuencias y evaluar la efectividad de medidas de mitigación en caso de liberación accidental de sustancias químicas (*United States Environmental Protection Agency [EPA], 2020*). La Figura 4.4 muestra la estructura general de esta metodología.

5

6

7

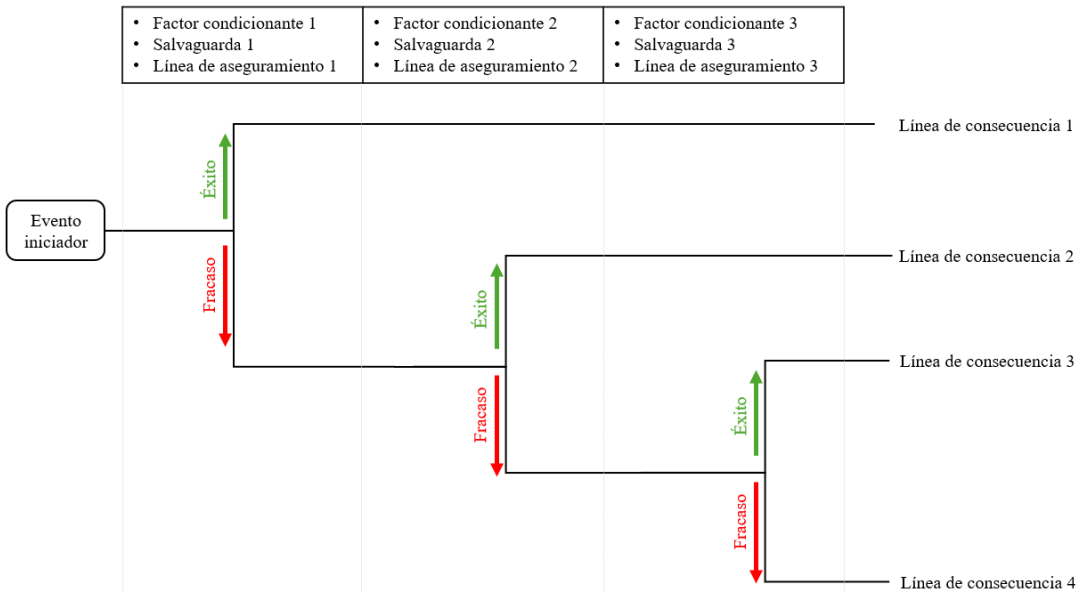


Figura 4.4. Estructura general de Análisis por Árbol de Fallas. Elaboración propia

ANÁLISIS POR MODOS DE FALLA Y SUS EFECTOS O FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA)

El análisis de modos y efectos de falla (FMEA) es una técnica sistemática que examina los posibles modos en que un componente puede fallar, las causas subyacentes y sus efectos sobre el sistema. A cada modo de falla se le asigna un índice de criticidad que combina la severidad, la ocurrencia y la detectabilidad. Este enfoque permite priorizar acciones correctivas para prevenir incidentes asociados a productos o procesos químicos (IEC, 2006).

Información de estudio FMEA						
Empresa/Dependencia/Institución:						
Planta/sección:				Fecha de realización:		
Sistema o punto en estudio:				Elaboró:		
Información complementaria:				Revisó:		
#	ID	Descripción	Modo de falla	Efectos	Protecciones	Recomendaciones
1	Tanque 1	Válvula de alivio	Obstrucción o falla de apertura	Sobrepresión, posible ruptura del tanque	Inspecciones programadas, válvula redundante, manómetro visible	Sustituir válvula cada 5 años, instalar sensor de presión conectado a sistema de alarma
.
.
n

Figura 4.5. Formato general para estudio de Análisis por Modos de Falla y sus Efectos

ANÁLISIS POR CAPAS DE PROTECCIÓN O LAYER OF PROTECTION ANALYSIS (LOPA)

El análisis de capas de protección (LOPA) es una técnica semicuantitativa que evalúa el riesgo residual de un evento peligroso, considerando las diferentes barreras independientes de protección (por ejemplo, sistemas instrumentados de seguridad, alarmas, procedimientos operativos). LOPA permite determinar si el riesgo es tolerable o si se requieren medidas adicionales, integrando principios de ingeniería de seguridad de procesos (CCPS, 2001).

4.4. ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS

El análisis de consecuencias es una fase crítica en la evaluación del riesgo químico, ya que permite estimar los posibles efectos derivados de un evento no deseado, tales como fugas, incendios, explosiones o emisiones tóxicas. Su propósito es cuantificar la magnitud del daño que podría producirse sobre las personas, el medio ambiente y la infraestructura, considerando variables como la cantidad de sustancia liberada, las condiciones meteorológicas y la proximidad de receptores vulnerables (*Center for Chemical Process Safety* [CCPS], 2022).

Este tipo de análisis proporciona información esencial para la toma de decisiones en materia de diseño de instalaciones, planificación de emergencias, ubicación de barreras físicas y delimitación de zonas de seguridad.

SIMULACIÓN DE ACCIDENTES

La simulación de accidentes consiste en la aplicación de modelos matemáticos y computacionales de escenarios de pérdida previamente planteados, como liberación de sustancias químicas peligrosas, incendios y explosiones, con el objetivo de predecir su comportamiento y alcance. Esta herramienta permite estimar las consecuencias de nubes tóxicas, ondas expansivas y radiaciones térmicas (*European Chemicals Agency* [ECHA], 2020).

Entre las herramientas más utilizadas para este fin se encuentran softwares especializados como ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*), PHAST (*Process Hazard Analysis Software Tool*) y EFFECTS. Estos programas integran bases de datos de propiedades fisicoquímicas y algoritmos de transporte atmosférico, permitiendo evaluar de manera precisa los efectos potenciales de accidentes mayores (*U.S. Environmental Protection Agency* [EPA], 2021).

1

2

3

4

5

6

7

Dentro de la simulación de accidentes, es importante resaltar que diversos factores deben ser considerados y aplicados con precaución. De no hacerlo así, los resultados obtenidos podrían variar significativamente y, por un lado, subestimar las consecuencias y no estar preparado en caso de que se presente un accidente. Por otro lado, si se sobrestiman las consecuencias, se pueden generar costos elevados por la implementación de dispositivos, planes y medidas de prevención en general.

Los parámetros más relevantes para considerar se mencionan a continuación:

- **Temperatura:** La temperatura es una medida del calor en el ambiente que influye en el comportamiento de sustancias químicas y su dispersión en el aire. En el contexto de emisiones o fugas, la temperatura ambiente afecta la densidad del aire y la volatilidad de los productos, mientras que la temperatura del material liberado puede influir en su fase (líquido, vapor o gas) y en su comportamiento de dispersión.
- **Cobertura del cielo:** se refiere al porcentaje del cielo cubierto por nubes en un momento determinado. Se clasifica generalmente en octavos (de 0/8 a 8/8) y puede influir en la estabilidad atmosférica, afectando la dispersión de contaminantes o vapores. Los cielos despejados suelen generar una mayor variabilidad térmica, mientras que cuando están cubiertos limitan el intercambio de calor con la atmósfera.
- **Velocidad y dirección del viento:** indica qué tan rápido se mueve el aire, mientras que la dirección del viento señala desde dónde proviene (expresada en grados o por puntos cardinales). Estos parámetros son cruciales para predecir la trayectoria y alcance de contaminantes atmosféricos, vapores tóxicos o inflamables en caso de fugas o emisiones.
- **Humedad relativa:** porcentaje de vapor de agua presente en el aire en comparación con la cantidad máxima que podría contener a una temperatura dada. Una alta humedad relativa puede afectar la dispersión de sustancias

1

2

3

4

5

6

7

higroscópicas o solubles, así como las reacciones químicas en la atmósfera, como la formación de nieblas tóxicas o aerosoles secundarios.

- **Condiciones de la fuente:** describen las características físicas y operativas del punto desde donde se libera una sustancia (por ejemplo, una válvula, brida, orificio, ducto o chimenea). Incluyen temperatura, presión, fase del material (gas, vapor, líquido), concentración y caudal. Estas condiciones determinan la magnitud y el tipo de liberación (fuga, chorro, evaporación, etc.).
- **Velocidad de salida:** es la rapidez con la que un material sale de la fuente de emisión, generalmente expresada en metros por segundo (m/s). Esta velocidad depende de la presión interna, la densidad del fluido y el tamaño del orificio, y afecta directamente la formación de chorros, penachos y el comportamiento inicial de dispersión.
- **Orificio de salida:** El orificio de salida es la abertura a través de la cual se libera una sustancia. Puede tener diferentes formas (circular, ranura, fisura) y tamaños, y su área influye en el caudal de liberación. Es un parámetro fundamental para estimar la tasa de fuga o emisión en modelos de dispersión y análisis de consecuencias.

En la Figura 4.6 se observa un ejemplo de las distancias estimadas a partir del punto de origen de un accidente simulado, dentro de las cuales se esperan efectos dañinos sobre las personas, bienes o el ambiente. Cada circunferencia muestra el alcance de diferentes magnitudes del parámetro de interés que se encuentre bajo estudio.

1

2

3

4

5

6

7

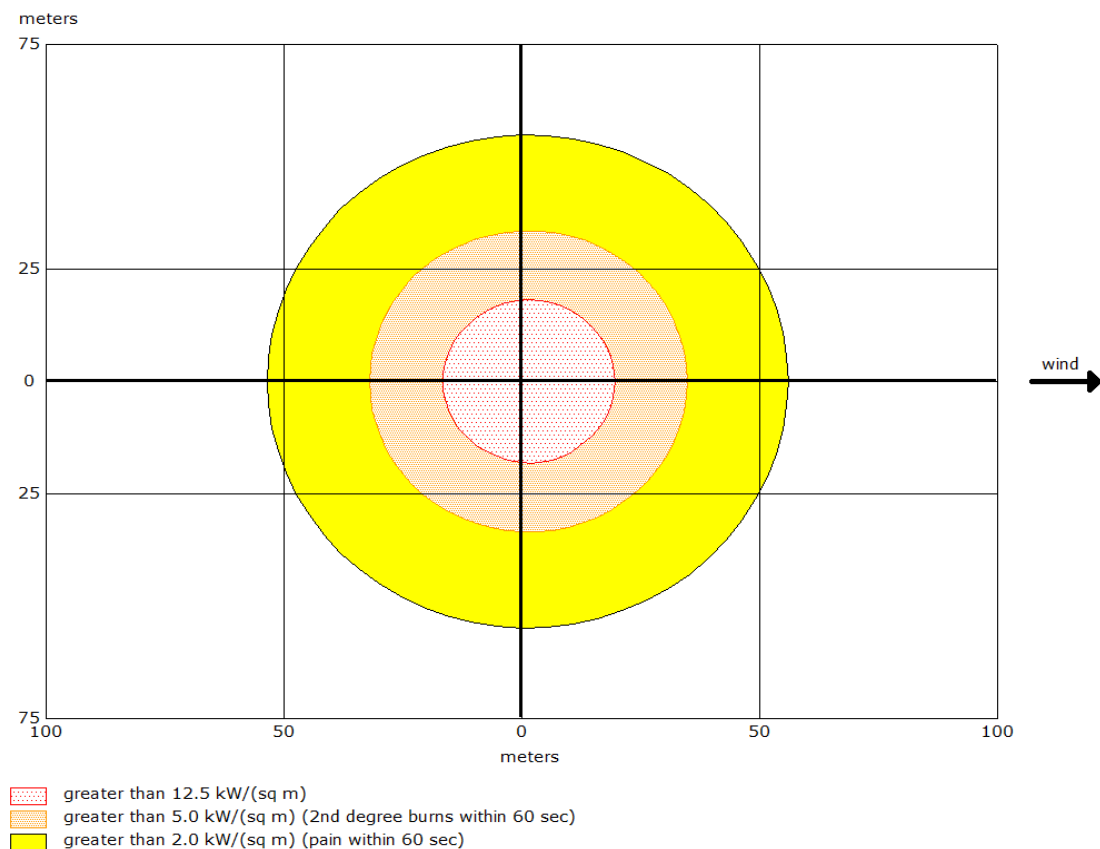


Figura 4.6. Ejemplo de radios de afectación de radiación térmica mediante el uso del software ALOHA

ESTIMACIÓN DE DAÑOS

La estimación de daños implica la cuantificación de los efectos adversos que un evento químico puede generar sobre la salud humana, el ambiente y la infraestructura. Para ello, se emplean modelos que relacionan variables físicas:

- Concentración: Partes por millón (ppm) o porcentaje dentro de la mezcla (%)
- Radiación térmica (kW/m^2)
- Sobrepresión (psi o kg/cm^2)

La información obtenida con las simulaciones proporciona las distancias y áreas de afectación para diferentes valores de concentraciones, radiaciones térmicas y sobrepresiones.

Por ejemplo, en el caso de una explosión, se puede calcular la sobrepresión generada y compararla con los niveles que causan daños estructurales o lesiones a personas.

En situaciones de liberación de gases tóxicos, se emplean curvas de toxicidad como las proporcionadas por la *National Research Council* (NRC) o los valores IDLH (*Immediately Dangerous to Life or Health*) definidos por el *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH).

Para el caso de radiaciones térmicas, se han estudiado valores desde los cuales, bajo determinado tiempo de exposición, se pueden generar quemaduras de diferentes grados en personas y daños de parciales a totales en materiales e infraestructura.

1

2

3

4

5

6

7

5 INFRAESTRUCTURA Y EQUIPO DE PROTECCIÓN

Dentro de cada industria, es indispensable la realización de estudios de riesgos considerando las etapas de identificación de peligros, análisis de riesgos y análisis de consecuencias. Como resultado, se contará con información que fundamente la toma de decisiones para la implementación de dispositivos de prevención, detección, combate y mitigación de consecuencias ante un posible accidente. Dentro de la infraestructura más común, se tienen los siguientes ejemplos:

Diques: Estructuras que buscan la contención de derrames, previniendo su propagación a otras áreas y facilitando su recuperación para utilizarlo o disponerlo adecuadamente (*Center for Chemical Process Safety*, 2010).

Materiales resistentes al fuego: Todos aquellos que pueden estar expuestos al fuego sin entrar en combustión en un periodo de tiempo determinado debido a sus propiedades ignífugas o retardantes, lo que permite su combate o proporciona tiempo que permita el arribo de equipos de seguridad o bomberos.

Equipos contra incendios: Los equipos contra incendios son un conjunto de dispositivos, manuales o automáticos, destinados a prevenir, detectar, controlar y extinguir incendios para proteger vidas y bienes. Incluyen extintores portátiles y móviles, sistemas de rociadores, hidrantes, detectores de humo, señalización, mangueras, retardantes de fuego y equipo de protección personal (*Secretaría del Trabajo y Previsión Social*, 2010).

Portátiles: diseñados para ser transportados y operados manualmente, con un peso total menor o igual a 20 kg, contienen un agente extinguidor para combatir un fuego incipiente (Figura 5.1).



Figura 5.1. Extintor portátil

Móviles: aquellos que son diseñados para ser transportados sobre ruedas, sin locomoción propia, con un peso superior a 20 kilogramos; contienen un agente extinguidor para combatir un fuego incipiente (Figura 5.2).



Figura 5.2. Extintor móvil

Fijos: son instalados permanentemente en ubicaciones estratégicas y pueden ser operados manual, semiautomática o automáticamente, con agentes adecuados para el tipo de fuego por extinguir.

Los sistemas de extinción incluyen hidrantes (Figura 5.3), monitores (Figura 5.4) y aspersores (Figura 5.5 y 5.6).



Figura 5.3. Hidrante



Figura 5.4. Monitor



Figura 5.5. Aspersor

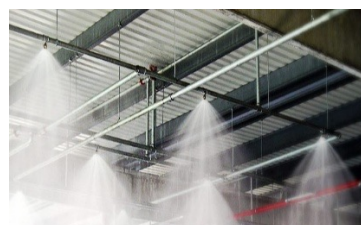


Figura 5.6. Sistema de aspersores

6 CONCLUSIONES

Es imperativo que los y las profesionales en el campo de la ingeniería distingan con precisión entre peligro (capacidad intrínseca de daño) y riesgo (probabilidad y consecuencia). La comprensión de que el riesgo no es estático, sino que depende de la exposición y la vulnerabilidad, constituye el pilar para diseñar estrategias preventivas eficaces que protejan tanto al capital humano como a la infraestructura y los ecosistemas.

Los accidentes químicos no son eventos aislados derivados únicamente de errores humanos o fallas mecánicas. La integración del concepto Natech subraya la necesidad de considerar los peligros naturales (geológicos e hidrometeorológicos) como detonantes de desastres tecnológicos. Ignorar esta interrelación en el diseño de plantas industriales o en los planes de ordenamiento territorial incrementa drásticamente la vulnerabilidad sistémica ante el cambio climático y la dinámica terrestre.

La evolución histórica de la seguridad industrial, marcada por tragedias como las ocurridas en Bhopal, San Juan Ixhuatepec y Seveso, ha consolidado un marco normativo robusto. En México, el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y la alineación con estándares internacionales (AIChE, CCPS, API) no deben verse como una carga administrativa, sino como una garantía de resiliencia operativa y responsabilidad social.

La aplicación de metodologías estructuradas (What if?, HazOp, FTA, ETA, LOPA, FMEA) permite transitar de una seguridad reactiva a una cultura de prevención proactiva. Estas herramientas, complementadas con la simulación de consecuencias mediante software especializado como ALOHA o SCRI, son indispensables para

predecir radios de afectación por radiación térmica, sobrepresión o nubes tóxicas, permitiendo una toma de decisiones basada en datos científicos.

La inversión en infraestructura de protección (diques, sistemas contra incendio, materiales ignífugos) y equipo de protección personal es el eslabón final de una cadena de seguridad exitosa. Un estudio de riesgos bien ejecutado pierde su valor si no se traduce en dispositivos físicos y protocolos de respuesta que limiten la magnitud del daño cuando las barreras preventivas fallan.

En conclusión, la gestión del riesgo químico es una disciplina dinámica que exige una actualización constante y un enfoque multidisciplinario. El dominio de los conceptos y técnicas presentados en este documento es esencial para cualquier ingeniera e ingeniero comprometidos con la operatividad segura, la protección ambiental y la preservación de la vida en una sociedad altamente industrializada.

1

2

3

4

5

6

7

7 BIBLIOHEMEROGRAFÍA

1. American Institute of Chemical Engineers. (s.f.). What is BLEVE?. AIChE. Recuperado el 24 de mayo de 2025, de <https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary/process-safety-glossary/boiling-liquid-expanding-vapor-explosion-bleve>
2. Ayala-Carcedo, F. J., & Olcina Cantos, J. (Coords.). (2002). *Riesgos naturales* (Colección Ariel Ciencia). Ariel. <https://books.google.com/books?id=9951K-1j3WtEC>
3. BBC News Mundo. (2020, 2 de mayo). Guadalajara 1992: qué causó la explosión que dejó más de 200 muertos y destruyó 8 km de calles en la ciudad mexicana. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-61178393>
4. Center for Chemical Process Safety. (2010, junio). Mensajes para el Personal de Manufactura: ¡Inspeccione y mantenga sus diques de contención y losas! [Boletín]. AIChE. Recuperado de <https://ccps.aiche.org/sites/default/files/ccps-beacon/2010/6/2010-06-Beacon-Spanish.pdf>
5. Center for Chemical Process Safety. (2022). Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis (2nd ed.). Wiley-AIChE. <https://doi.org/10.1002/9781119719170>
6. Center for Chemical Process Safety. (2001). Layer of Protection Analysis: Simplified process risk assessment. Wiley-AIChE.
7. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (s.f.). Glosario de términos. Atlas Nacional de Riesgos. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/IGOPP/glosario.php>
8. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (19 de noviembre de 2019). A 35 años del 19 de noviembre de 1984. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/a-35-anos-del-19-de-noviembre-de-1984>
9. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (3 de diciembre de 2019). La catástrofe industrial más grande de la historia. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/la-catastrofe-industrial-mas-grande-de-la-historia>

1

2

3

4

5

6

7

10. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (22 de abril de 2020). Efeméride: A 28 años de las explosiones en Guadalajara. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/efemeride-a-28-anos-de-las-explones-en-guadalajara>
11. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (s.f.). Glosario de términos. Atlas Nacional de Riesgos. Recuperado el 24 de mayo de 2025, de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/IGOPP/glosario.php>
12. Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME). (2025). Monitoreo atmosférico en zonas industriales: detección de aumentos súbitos de compuestos peligrosos como SO₂ y NH₃. Recuperado de <https://app.semarnat.gob.mx/came-app/>
13. Comisión Nacional del Agua. (2020). Contaminación del agua por sustancias peligrosas. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua>
14. Deutsche Welle. (2017, 14 de junio). Siete heridos en el incendio de una refinería de Pemex. DW. <https://www.dw.com/es/siete-heridos-en-el-incendio-de-una-refiner%C3%ADa-de-pemex/a-39258721>
15. Diario Oficial de la Federación (DOF). (1988). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_270123.pdf
16. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2000). Ley General de Salud. Secretaría de Salud. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/142_070324.pdf
17. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2002). NOM-087-ECOL-SSA1-2002. Protección ambiental – Salud ambiental – Residuos peligrosos biológico-infecciosos – Clasificación y especificaciones de manejo. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=734187&fecha=17/02/2003
18. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2005). NOM-052-SEMARNAT-2005. Establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2048154&fecha=23/06/2006
19. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2010). NOM-002-STPS-2010. Condiciones de seguridad – Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5173187&fecha=09/12/2010
20. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2011). NOM-003-SEGOB-2011. Señales y avisos para protección civil. Secretaría de Gobernación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5212443&fecha=23/12/2011
21. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2012). NOM-028-STPS-2012. Sistema

1

2

3

4

5

6

7

- para la administración del trabajo con sustancias químicas peligrosas en los procesos industriales. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5278298&fecha=06/11/2012
22. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2014). NOM-010-STPS-2014. Agentes químicos contaminantes del ambiente laboral – Reconocimiento, evaluación y control. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5374281&fecha=28/04/2014
 23. Diario Oficial de la Federación (DOF). (2015). NOM-018-STPS-2015. Sistema Armonizado para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421605&fecha=09/10/2015
 24. Diario Oficial de la Federación (DOF). (última reforma vigente). Ley Federal del Trabajo. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/125_010124.pdf
 25. Diario Oficial de la Federación (DOF). (última reforma vigente). Ley General de Protección Civil. Secretaría de Gobernación. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPC.pdf>
 26. Diario Oficial de la Federación (DOF). (última reforma vigente). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_260122.pdf
 27. Diario Oficial de la Federación (DOF). (última reforma vigente). Ley de Hidrocarburos. Secretaría de Energía. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LHidro_230323.pdf
 28. Ecologistas en Acción. (2016, 10 de julio). Accidente de Seveso. Ecologistas en Acción. <https://www.ecologistasenaccion.org/26136/accidente-de-seveso/>
 29. Environmental Protection Agency. (2023, 3 de enero). Exxon Valdez Oil Spill. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/emergency-response/exxon-valdez-spill-profile>
 30. European Chemicals Agency. (2020). Guidance on information requirements and chemical safety assessment. <https://echa.europa.eu/guidance-documents>
 31. European Process Safety Centre. (2019). HazOp: Hazard and operability analysis [Technical report]. European Process Safety Centre. <https://www.epsc.org/hazop-guide-2019.pdf>
 32. European Environment Agency. (2019). Contaminated sites and soil. <https://www.eea.europa.eu>

1

2

3

4

5

6

7

33. International Electrotechnical Commission. (2006). IEC 60812:2006 – Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA). <https://www.iec.ch/standards/iec60812>
34. International Labour Organization. (s.f.). Seveso disaster – Italy, 1976. Recuperado el 24 de mayo de 2025, de <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6221983/>
35. Krausmann, E., Cruz, A. M., & Salzano, E. (2017). Natech risk assessment and management: Reducing the risk of natural-hazard impact on hazardous installations. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780444639478/natech-risk-assessment-and-management>
36. Naciones Unidas. (2021). Sistema globalmente armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos (SGA) (9.^a ed. revisada, ST/SG/AC.10/30/Rev.9sp). Naciones Unidas. https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs_rev09/Spanish/ST-SG-AC10-30-Rev9sp.pdf
37. National Geographic. (s.f.). Bhopal Disaster. Recuperado el 24 de mayo de 2025, de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/catastrofe-quimica-en-bhopal>
38. National Institute for Occupational Safety and Health. (2019). IDLH values. <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/default.html>
39. Necci, A., & Krausmann, E. (2022). Natech risk management: Guidance for operators of hazardous industrial sites and for national authorities (EUR 31122 EN; JRC129450). Publications Office of the European Union. Recuperado de <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC129450>
40. International Labour Organization. (2021). State of the evidence: Results from the ILO Global Chemicals Review . https://www.ilo.org/global/publications/WCMS_811455/lang--en/index.htm
41. Organization for Economic Co-operation and Development. (2017). Guidance on Safety Performance Indicators. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-guidance-on-safety-performance-indicators_9789264019119-en.html
42. Organización Mundial de la Salud. (2016). Ambient (outdoor) air pollution. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
43. Occupational Safety and Health Administration. (2020). Routes of exposure to chemical hazards. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/chemical-hazards/routes-of-exposure>

1

2

3

4

5

6

7

44. Occupational Safety and Health Administration. (2016). Process hazard analysis (PHA) methods [Fact sheet]. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/OSHA3248.pdf>
45. Rodríguez, E. (24 de marzo 2014). Alaska se tiñó de negro hace un cuarto de siglo. Agencia SINC. <https://www.agenciasinc.es/Reportajes/Alaska-se-tino-de-negro-hace-un-cuarto-de-siglo>
46. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), Transport Canada, & U.S. Department of Transportation. (2024). Guía de respuesta en caso de emergencia 2024. Safety Management Resources. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/914690/II.3_GRE2024__1_-_.pdf
47. Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2010). NOM-002-STPS-2010: Condiciones de seguridad – Prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/422618/NOM-002-STPS-2010__Condiciones_de_seguridad-Prevencion_y_proteccion_contra_incendios_en_los_centros_de_trabajo.pdf
48. Showalter, P. S., & Myers, M. F. (1994). Natural disasters in the United States as release agents of oil, chemical, or radiological materials between 1980–1989: Analysis and recommendations. *Risk Analysis*, 14(2), 169–182. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1994.tb00022.x>
49. United States Environmental Protection Agency. (2020). Risk Management Program guidance for offsite consequence analysis. <https://www.epa.gov/rmp>
50. Volke Sepúlveda, T., & Velasco Trejo, J. A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). Recuperado de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/372.pdf>

1

2

3

4

5

6

7



Apuntes de riesgo químico

se publicó en el repositorio de la Facultad de Ingeniería en junio de 2026.

Primera edición electrónica de un ejemplar (10 MB) en formato PDF.

El cuidado de la edición y diseño estuvieron a cargo de la Unidad de Apoyo Editorial de la Facultad de Ingeniería. Las familias tipográficas utilizadas son Source Serif Pro y Rubik con sus respectivas variantes.