

# METODOLOGÍAS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LOS DAÑOS AMBIENTALES Y HUMANOS DE ACCIDENTES DE INCENDIO Y EXPLOSIÓN

MSc. Julio Ariel Dueñas Santana<sup>1</sup>, Ing. Dainelys Febles Lantigua<sup>2</sup>, Dr.C. Lourdes Yamen González Sáez<sup>1</sup>

1. Universidad de Matanzas, [julio.ariel@umcc.cu](mailto:julio.ariel@umcc.cu)

2. Empresa de Producción de ácido sulfúrico en Matanzas

## Resumen

Los accidentes industriales constituyen una afectación considerable a la calidad ambiental, además de, dañar a las personas expuestas a sus efectos. Por ese motivo, el objetivo de esta investigación es describir las metodologías existentes para cuantificar el impacto ambiental y humano debido a incendios y explosiones. En cuanto a la evaluación del impacto ambiental, la metodología ofrecida por Conesa (2000), es la que permite, a través de funciones, emitir un criterio de calidad ambiental en función de la magnitud de un impacto determinado. Además, el impacto ambiental puede ser evaluado, en cuanto a la producción de humo de un incendio, y las emisiones de dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno e hidrocarburos. En función de lo analizado, las ecuaciones Probit Y para cuantificar el impacto humano, son esenciales. Las ecuaciones propuestas por Lees (2012) para calcular los daños por sobrepresión y quemaduras por radiación, son ampliamente utilizadas.

*Palabras claves:* Accidentes; impacto ambiental; impacto humano; incendio; explosión.

---

## Introducción

En estos últimos años el mundo ha experimentado una rápida evolución tecnológica, debido a esto ha surgido la necesidad de crear instalaciones industriales con el objetivo de satisfacer la demanda. Esta evolución ha dado lugar a la creación de industrias petroquímicas a nivel mundial. Estas industrias representan un alto riesgo de incendio y explosión por el elevado nivel de inflamabilidad y volatilidad de las sustancias que se manejan. Estos riesgos se han puesto de actualidad en las últimas décadas, a causa de accidentes de graves consecuencias con efectos negativos para el medio ambiente y las personas. Es de vital importancia el análisis de riesgos para identificar posibles escenarios la probabilidad de ocurrencia y los daños que estos puedan causar y prevenirlos.

Los accidentes en las industrias de procesos químicos no solo pueden causar pérdidas de vida y propiedad sino también un daño irreparable e incalculable al medio ambiente. Muchos autores plantean que los accidentes químicos son las peores formas de contaminación ambiental que existen, ya que, en un breve período de tiempo ocurre un deterioro considerable de la calidad ambiental debido a los gases que se generan. En Cuba existen empresas de perforación de petróleo, comercializadoras de combustibles y refinerías encargadas del procesamiento del petróleo crudo con distintos fines. Por esa razón, el objetivo de esta investigación es describir las metodologías existentes para cuantificar el impacto ambiental y humano debido a incendios y explosiones.

## Desarrollo

En las primeras etapas de planeación y cuando se tiene poca información detallada del proceso se utilizan índices simples. El desarrollo de un índice de peligro para sistemas no es una tarea fácil, puesto que requiere el conocimiento necesario para la viabilidad del sistema estudiado hacia el ambiente. Muchos índices se usan solamente en funciones específicas y no deben ser empleados en comparaciones más generales de seguridad.

La NFPA (1994), desarrolló un sistema que indica la inflamabilidad, reactividad y peligros para la salud de químicos peligrosos. El sistema se basa en dar un número de 0 a 4 a un químico, indicando su efecto. Índices detallados se consideran usualmente en muchos efectos ambientales o estudios, en detalles, de ciertos efectos sobre la vida en la planta (Aboud, 2008).

Índices detallados se consideran usualmente en muchos efectos ambientales o estudios, en detalles, de ciertos efectos sobre la vida en la planta. El Índice de Peligro Ambiental (EHI) en plantas químicas, estima el impacto ambiental del total de químicos relacionados en el inventario. El índice considera el peligro a ecosistemas acuáticos y terrestres.

El índice de peligro atmosférico (AHÍ), propuesto por Gunasekera et al. (2003), se usa para evaluar el impacto potencial de partículas transportadas por el aire relacionadas a productos químicos. Se asume una falla catastrófica de la planta y se estima el impacto sobre el

ambiente atmosférico. El método se diseña para evaluar posibles alternativas de roturas en un proceso donde se escape un compuesto químico.

El peligro primario en la industria química reside en el material, ya que este es un peligro hasta solo en el almacenamiento y desde luego, en el procesamiento u otra actividad.

Se propone un índice simple K, partiendo de la definición básica de riesgo, el cual se considera el producto de la probabilidad del incidente con la magnitud de sus efectos peligrosos. Este índice se puede aplicar a plantas químicas, empleando las propiedades de los químicos asociados a la producción. Es un índice que cuantifica riesgo a la vida humana.

El índice es:

$$K = Freq \times Haz \times Inv \times Size$$

Donde Freq es la frecuencia de los accidentes, específicamente el número de accidentes por procesos por año. Haz es el efecto peligroso de un químico, el número de personas afectadas por tonelada de químico liberado. Inv es el inventario de los químicos liberados en toneladas por accidentes. Size es el tamaño de la planta, el número de los procesos mayores en la planta.

Este índice da una unidad global de K como número de personas afectadas por año, y representa el número máximo potencial de personas afectadas, en el caso de que un accidente cause el escape de todo el inventario de la planta de un químico determinado. Las personas afectadas incluyen fatalidades, personas afectadas y hospitalizadas. Se asume que la planta presenta un proceso mayor, en el cual un químico mayor se trata y un accidente en una parte de la planta puede causar, en un caso extremo, el escape del inventario de la planta.

Los peligros del químico (Haz) se calcula a partir de bases de datos de accidentes, mirando el número de todos los accidentes asociados con el químico y dividiendo el número de personas afectadas por la cantidad escapada.

El inventario (Inv) se toma como la producción máxima inventariada en una planta petroquímica, usualmente en un mes de producción. La producción económica mínima se usa para evaluar el inventario, si el actual flujo de producción no está determinado o planeado.

El tamaño de la planta (Size), en términos de procesos mayores, puede variar de una planta a otra, pero se toma como 3 este número generalmente.

De los valores usados para los parámetros el índice depende la evaluación más realista del índice de riesgo. El índice se puede usar, además, en los siguientes casos:

1. El índice puede ser aplicado a una planta química incluyendo químicos mayores o menores. El índice en este caso se calcula como la sumatoria de los índices de los químicos individualmente.
2. Se usa el inventario de un mes de producción para calcular un máximo teórico para el riesgo. Consecuentemente, se emplea un valor alto para el inventario.
3. El número usado para el tamaño es un número representativo, una media. Puede ser empleado el actual número de procesos mayores.
4. El índice puede aplicarse para químicos en una planta, la cual no sea de almacenamiento. En este caso, un estimado para su inventario en el proceso se usa.
5. El índice se puede usar para estimar el riesgo desde un proceso simple en una planta, en este caso el tamaño debe ser tomado como 1 y el inventario como el inventario de químicos dentro del proceso.

Al-Sharrah et al. (2007) indican que el índice incluye la experiencia de previos accidentes en base de datos, las cuales se consideran fuente de valores de la información.

En el estudio Análisis ambiental propuesto: Indiana Relative Chemical Hazard Score (IRCHS) Index se cuantifica la sostenibilidad por un índice ambiental, índice de seguridad y el incremento de la ganancia para el proceso por el valor añadido.

De acuerdo al IRCHS, el método de la Universidad de Tennessee (UTN) evalúa cada químico de forma separada y asigna un valor de peligro basado sobre los peligros químicos con respecto al ambiente, con énfasis sobre el sistema acuífero.

El algoritmo de IRCHS incluye peligros hacia el ambiente en estos casos: calidad del aire, contaminación potencial para los suelos y aguas subterráneas y reducción de ozono estratosférico.

Este algoritmo asigna para los químicos un valor de peligro ambiental. Además, asigna valores basados en los peligros hacia los trabajadores de la industria. Los dos valores de peligros se combinan y su media el valor de peligro combinado para el químico. Estos valores de peligro permiten establecer un ranking en los químicos por peligro al ambiente y a los trabajadores.

El índice Indiana Relative Chemical Hazard Score (IRCHS) cuantifica la sostenibilidad por un índice ambiental, índice de seguridad y el incremento de la ganancia para el proceso por el valor añadido. De acuerdo al IRCHS, el método de la Universidad de Tennessee (UTN) evalúa cada químico de forma separada y asigna un valor de peligro basado sobre los peligros químicos con respecto al ambiente, con énfasis sobre el sistema acuífero (Aboud, 2008).

El índice de peligro atmosférico (AHI), propuesto por Gunasekera y Edwards (2003), se usa para evaluar el impacto potencial de partículas transportadas por el aire relacionadas a productos químicos. Se asume una falla catastrófica de la planta y se estima el impacto

sobre el ambiente atmosférico. El método se diseña para evaluar posibles alternativas de roturas en un proceso donde se escape un compuesto químico. El peligro primario en la industria química reside en el material, ya que este está presente, hasta solo en el almacenamiento y, desde luego, en el procesamiento u otra actividad.

El Índice de Severidad de Biodiversidad (BSI) para escenarios de contaminación accidental es la respuesta a la siguiente interrogante: “Si el escenario S ocurriera en las condiciones corrientes con respecto a la funcionalidad de la planta industrial estudiada y sus alrededores, cuán importante sería para la sociedad, sus esperadas consecuencias sobre el ambiente circundante” (Denat, 2017).

Blengini et al. (2017) proponen un Índice de Sustitución en función de cambiar sustancias dañinas al medio ambiente por otras menos dañinas, en función de su costo. Este se basa en la toxicología de las sustancias a sustituir.

El índice de evaluación del riesgo ambiental de Chen et al. (2013) consiste en tres etapas: caracterizar el nivel de riesgo, desarrollar un algoritmo de evaluación para cuantificar el riesgo ambiental, y evaluar el riesgo ambiental con los datos recogidos, Se desarrolla un índice para la evaluación del riesgo ambiental para la industria petroquímica basado en los siguientes cinco indicadores mayores:

- Materiales peligrosos.
- Condición de equipamiento incluyendo bombas, tuberías y tanques de almacenamiento.
- Proceso productivo.
- Seguridad ambiental y salud.
- Vulnerabilidad de receptores.

Cada indicador mayor es subdividido, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Sistema del índice de la evaluación del riesgo ambiental para la industria petroquímica.

Indicadores mayores	Indicadores menores	Explicación del indicador
Materiales peligrosos	Cantidad	La cantidad de materiales peligrosos en el almacenamiento y producción (kg).
	Propiedad	Las propiedades químicas y físicas de

		materiales peligrosos.
Proceso productivo	Tipo de reacción	Reacciones químicas. Reacciones físicas.
	Temperatura	La temperatura del reactor (°C)
	Presión	La presión del reactor
Condición del equipamiento	Riesgo inherente al equipamiento	La cantidad de accidentes inherentes del equipamiento
	Depreciación	Años de uso del equipamiento
	Cantidad de fallas	Cantidad de fallas del equipamiento sobre una base anual
Seguridad ambiental y salud	Sistemas de monitoreo	Dispositivos y sistemas de control monitoreando emisiones contaminantes y procesos productivos
	Sistema de gestión	ISO 14000 y ISO 18000
	Sistema de emergencia	Acción de emergencia y planes de responsabilidad
	Habilidad de los trabajadores	Años de experiencia y nivel de entrenamiento de los trabajadores
Vulnerabilidad del receptor	Densidad de población	Densidad de la población cerca de la planta
	Proximidad de objetivos ecológicos y otras	Número de objetivos ecológicos, número de otras plantas petroquímicas o similares

	entidades comerciales	
	Situación local de responsabilidad de emergencia	Caminos aceptables y distancia a facilidades médicas

Los riesgos ambientales dentro de las plantas petroquímicas se asocian con las fuentes de los riesgos y los receptores de los riesgos, los cuales pueden incluir la población local y objetivos ecológicamente sensibles como las fuentes de agua.

Cuando la vulnerabilidad de los receptores del riesgo se incrementa, la contaminación ambiental y las pérdidas económicas provocadas por los accidentes también crece. Por eso, el índice de riesgo ambiental es una función de los factores de influencia del riesgo ambiental.

La Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) como un proceso de análisis encaminado a identificar, predecir, interpretar, valorar, prevenir o corregir y comunicar, el efecto de un Proyecto sobre el Medio Ambiente. El objetivo del modelo es llegar a establecer, en primer lugar, y a través de los factores ambientales considerados, los indicadores capaces de medirlos, la unidad de medida y la magnitud de los mismos, transformando estos valores en magnitudes representativas, no de su alteración, sino de su impacto neto sobre el Medio Ambiente. El indicador de un factor ambiental es la expresión por la que es capaz de ser medido. Si esta última es cuantitativa, la cuantificación será directa, y el indicador será muy similar al propio factor. Los efectos sobre el medio vienen medidos en unidades heterogéneas, y, por tanto, sin posibilidad de comparación entre las de los distintos factores, ni de adición o sustracción de manera directa (magnitudes inconmensurables). Al estar medidas las magnitudes en unidades heterogéneas, no se pueden cuantificar resultados globales, tales como el impacto total sobre un componente ambiental, sobre un subsistema, o el impacto total que, sobre el medio ambiente, ejerce la actividad en su conjunto. Por esta razón, surge la necesidad de homogenizar las diferentes unidades de medida y, en último caso, expresarlas todas ellas en unidades abstractas de valor ambiental. Por lo que el valor en magnitud del indicador del impacto sobre un factor determinado, en unidades inconmensurables, se transforma en el índice de calidad que dicha magnitud representa, en cuanto a estado ambiental del indicador.

El proceso consiste en referir todas las magnitudes de los efectos a una unidad de medida común a la que denominamos unidad de impacto ambiental. Esta transformación es compleja y requiere un desarrollo, en la investigación de efectos, muy importante, y acabaría en la definición de una función distinta para cada indicador de impactos que permitiera obtener el índice de calidad ambiental de un factor en función de la magnitud del impacto recibido. Uno de los gases más tóxicos que afectan a la atmósfera es el monóxido de carbono, el cual, durante un incendio, aumenta considerablemente su concentración en la

atmósfera. Existe una función de transformación para la concentración del mismo en calidad ambiental (Conesa, 2000).

El humo reduce considerablemente la visibilidad, en función de la densidad óptica del combustible (Hadjisophocleous y Benichou, 2016).

Los accidentes por incendio, dañan a los recursos humanos debido al valor elevado de calor por radiación, mientras que las explosiones, lo hacen, a través del efecto de la onda expansiva u onda de choque. En este epígrafe se relacionan las herramientas que permiten cuantificar el impacto en los recursos humanos de este tipo de accidentes.

About (2008), propone un índice simple K, partiendo de la definición básica de riesgo, el cual se considera el producto de la probabilidad del incidente con la magnitud de sus efectos peligrosos. Este índice se puede aplicar a plantas químicas, empleando las propiedades de los químicos asociados a la producción. Es un índice que cuantifica riesgo a la vida humana.

El Índice de Severidad de Biodiversidad (BSI) descrito en el epígrafe anterior, también evalúa impacto humano, en cuanto a toxicidad (Denat, 2017). Según Casal et al. (2002), Wells (2003) y Sanmiquel et al. (2018), para realizar una estimación de las consecuencias se requiere una función que relacione la magnitud del impacto, con el grado de daño causado por el mismo; se debe establecer una relación entre la dosis y la respuesta. El método más utilizado es el del análisis Probit, que relaciona la variable Probit (de *probability unit*) con la probabilidad.

La Probit Y es una medida del porcentaje de la población vulnerable sometida a un fenómeno perjudicial de una determinada intensidad (V), que recibe un daño determinado. Tiene una distribución normal, con una media de 5 y una desviación normal de 1. La relación entre la variable Probit (Y) y la probabilidad P es la que se muestra en la ecuación 1.

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left[-\frac{V^2}{2}\right] dV \quad (1)$$

Esta relación tiene la ventaja de transformar la función sigmoideal que corresponde a la relación dosis-respuesta en una línea recta cuando se representa la función probit a escala lineal; lo que facilita considerablemente el ajuste de las constantes (Casal et al., 2002).

Normalmente la probabilidad (que varía de 0 a 1) se sustituye por un porcentaje (de 0 a 100), lo cual es más práctico en el análisis de riesgo. Para su aplicación se suele utilizar la ecuación 2.

$$Y = a + b \ln V \quad (2)$$



Donde a y b son constantes que se determinan experimentalmente a partir de la información procedente de accidentes o, en algunos casos, de experimentación con animales. La variable V, es una medida de la intensidad de lo que causa el daño, puede tratarse de un solo parámetro (por ejemplo, una sobrepresión) o puede estar formada por una función de diversas variables (por ejemplo, una combinación de concentración y tiempo). La aplicación de este porcentaje sobre la población afectada por el accidente permitirá estimar el número de víctimas (Casal et al., 2002).

Las consecuencias de la radiación térmica sobre la piel son las quemaduras, cuya gravedad depende de la intensidad de la radiación y de la dosis recibida. Según sea su profundidad las quemaduras se clasifican en tres categorías:

- ✓ Quemaduras de primer grado: afectan la epidermis de la piel, esta enrojece, pero no se forman ampollas; provocan dolor de poca intensidad.
- ✓ Quemaduras de segundo grado: pueden ser superficiales o profundas; provocan la aparición de ampollas.
- ✓ Quemaduras de tercer grado: afectan al grueso de la piel, que es destruida.

La existencia de quemaduras en una superficie importante del cuerpo, con la consiguiente destrucción o degradación de la piel, provoca la pérdida de fluido y aumenta extraordinariamente la probabilidad de infecciones. La esperanza de vida de un quemado está estrechamente condicionada por la superficie del cuerpo afectada por quemaduras de segundo y tercer grado. En el caso de quemaduras con una extensión de aproximadamente un 30% o más de la superficie corporal, puede producirse un choque. El denominado límite soportable para las personas se considera del orden de  $5 \text{ kW/m}^2$ . Como valor de referencia se toma el valor de la intensidad de la radiación solar en un día soleado, que es de aproximadamente  $1 \text{ kW/m}^2$  (a nivel del mar).

## Conclusiones

En cuanto a la evaluación del impacto ambiental, la metodología ofrecida por Conesa (2000) es la que permite, a través de funciones, emitir un criterio de calidad ambiental en función de la magnitud de un impacto determinado. Este impacto se define como la concentración de monóxido de carbono que se produce durante un incendio. Además, el impacto ambiental puede ser evaluado, en cuanto a la producción de humo de un incendio, y las emisiones de dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno e hidrocarburos. En función de lo analizado, las ecuaciones Probit Y para cuantificar el impacto humano, son esenciales. Existen diversas ecuaciones Probit Y, que calculan los daños a los recursos humanos por radiación y sobrepresión, entre las que se encuentran las propuestas por Casal et al. (2002), Wells (2003) y Lees (2012). Las ecuaciones propuestas por Lees (2012), para calcular los daños por sobrepresión y quemaduras por radiación, son ampliamente utilizadas; mientras que la ecuación de Wells (2003), para porcentaje de muertes por hemorragia pulmonar debido a una sobrepresión.

## Referencias bibliográficas

ABOUD, A. Planning of petrochemical industry under environmental risk and safety considerations. Waterloo, Ontario, Canadá. 200 p. Tesis en opción al grado de Máster de Ciencias Aplicadas en Ingeniería Química. Universidad de Waterloo. 2008.

BLENGINI, G.A., BLAGOEVA, D., DEWULF, J., TORRES DE MATOS, C., NITA, V., VIDAL-LEGAZ, B., LATUNUSSA, C.E.L., KAYAM, Y., TALENS PEIRÒ, L., BARANZELLI, C., MANFREDI, S., MANCINI, L., NUSS, P., MARMIER, A., ALVES-DIAS, P., PAVEL, C., TZIMAS, E., MATHIEUX, F., PENNINGTON, D. AND CIUPAGEA, C. Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials, Publications Office of the European Union, Luxemburg. 978-92-79-69612-1, doi:10.2760/73303, JRC106997. 2017.

CASAL, J.; MONTIEL, H.; PLANAS, E.; VÍLCHEZ, J.. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. 2da ed. Barcelona: Ediciones UPC. 362 p. 2002.

CHEN, Q.; JIA, Q.; YUNA, Z.; HUANG, L. Environmental risk source management system for the petrochemical industry. Process Safety and Environmental Protection [en línea]. PSEP-343. [citado 22 enero 2018]. DOI: 10.1016/j.psep.2013.01.004. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/psep](http://www.elsevier.com/locate/psep). 2013.

CONESA, V. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Madrid. 3ra ed. Edición Mundi-prensa. 401 p. 2000.

DENAT, T. Creation of a Biodiversity Severity Index to evaluate the risks of accidental pollutions in the industry: a multi-criteria sorting approach. París. 270 p. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias. Universidad de París. 2017.

GUNASEKERA, M Y EDWARDS, D. Estimating the Environmental Impact of Catastrophic Chemical Release to the Atmosphere, An Index Method for Ranking Alternative Chemical Process Routs. Trans IChemE. Vol. 81. P 463-474. 2003.

HADJISOPHOCLEOUS Y BENICHO. Fire safety design guidelines for federal buildings. [en línea]. NRC Publications Archive. [citado 20 junio 2017]. Disponible en <https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/fulltext/?id=063cc389-d483-4a62-aa43-b163cf01138d>. 2016.

LEES, F.P. Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control, fourth edition. ED. Mannan S., Elsevier Butterworth-Heinemann. 2012.

SANMIQUEL, L.; BASCOMPTA, M.; ROSSELL; ANTIOCO, H.; GUASH, E. Analysis of occupational accidents in underground and surface mining in Spain using data-mining

techniques. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. [en línea]. Vol.15. No. 462. [citado 16 mayo 2018]. DOI: 10.3390/ijerph15030462. Disponible en: [www.mdpi.com/journal/ijerph](http://www.mdpi.com/journal/ijerph). 2018.

WELLS, G. *Major Hazards and their management*. Gulf Publishing Company. Houston, Texas. 315 p. 2003.