

Propuesta didáctica sobre evaluación de riesgos para la salud de las sustancias tóxicas atmosféricas

Didactic proposal on health risk assessment of atmospheric toxic substances

Faviola Altúzar Villatoro¹ y José Agustín García Reynoso¹

Resumen

En México, el marco regulatorio obliga a los sectores industriales que realizan actividades altamente riesgosas, a presentar una evaluación de riesgo ambiental en casos específicos como derrames, fugas, incendios o explosiones sin tomar en cuenta, los posibles impactos que pueden generarse por la operación diaria de las industrias que liberan continuamente sustancias tóxicas a la atmósfera. Si bien, se contempla la evaluación de la calidad del aire con base en límites máximos permisibles de contaminantes criterio que buscan proteger la salud, no se cuenta con instrumentos que exijan a la industria a realizar un análisis de riesgos para la salud de la población expuesta a contaminantes atmosféricos que ellos mismos emiten, por lo que no se lleva a cabo. En este trabajo se presenta una propuesta metodológica para enseñar la evaluación de estos riesgos, que comienza con el marco teórico, el procedimiento de evaluación de riesgos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y los índices comunes para la comunicación de riesgos. Se incluye el proceso de evaluación mediante un caso de estudio que utiliza información del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), así como de la Tabla Consolidada de Valores de la Junta de Recursos del Aire de California. Además, se proporcionan otras referencias que muestran casos de estudio desarrollados con esta metodología, los cuales han permitido identificar fuentes y sustancias que podrían representar un riesgo potencial para la salud humana y el medio ambiente. Este trabajo puede servir como guía para el desarrollo de material didáctico y legislación ambiental en la materia.

Palabras clave: evaluación, enseñanza universitaria, contextualización, riesgo ambiental, tóxicos atmosféricos, RETC.

Abstract

In Mexico, the regulatory framework mandates that industrial sectors engaging in high-risk activities must submit an environmental risk assessment for specific scenarios such as spills, leaks, fires, or explosions. However, this requirement does not consider the potential impacts that may arise from the daily operations of industries that continuously release toxic substances into the atmosphere. While air quality assessments are conducted based on maximum permissible limits of criteria pollutants aimed at protecting public health, there are no instruments in place that require industry to conduct a risk analysis for the health of the population exposed to atmospheric pollutants that they themselves emit. In this work, a methodological proposal is presented to teach the evaluation of these risks, which begins with the theoretical framework, the United States Environmental Protection Agency (EPA) risk assessment procedure and common indices for risk communication. The evaluation process includes a case study that uses information from the Pollutant Release and Transfer Registers (PRTR), as well as the California Air Resources Board's Consolidated Table. In addition, other references are provided that show case studies developed with this methodology, which have allowed the identification of sources and substances that could represent a potential risk to human health and the environment. This work can serve as a guide for the development of teaching materials and environmental legislation on the subject.

Keywords : evaluation, university teaching, contextualization, environmental risk, atmospheric toxics, PRTR.

CÓMO CITAR:

Altúzar Villatoro, F., y García Reynoso, J. A. (2025, enero-marzo). Propuesta didáctica sobre evaluación de riesgos para la salud de las sustancias tóxicas atmosféricas. *Educación Química*, 36(1). <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2025.1.88739>

¹ Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Introducción

La evaluación de riesgos asociados a contaminantes atmosféricos, tanto provenientes de eventos naturales como de actividades humanas, es crucial debido a la presencia de sustancias que pueden afectar la salud, el ambiente o incluso impactar en la economía. Estas sustancias, presentes en concentraciones bajas y a largo plazo, pueden causar efectos crónicos irreversibles, como el cáncer (Giuliani et al., 2021). Sin embargo, los posibles efectos adversos para la salud provocados por los compuestos químicos que se liberan durante las operaciones industriales normales a menudo no son debidamente cuantificados.

En el marco de la materia de riesgo por contaminantes atmosféricos del posgrado en Ciencias de la tierra y de la materia de Protección ambiental III en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, se aborda específicamente el tema de la evaluación de riesgos asociados a contaminantes atmosféricos. Actualmente, la legislación mexicana no requiere este tipo de evaluaciones (LGEEPA, 2024; SEMARNAT, 2018). Por lo tanto, en este trabajo se presenta un método integral, junto con aplicaciones prácticas y referencias fundamentales, que pueden servir como base para la elaboración de estudios de este tipo.

El propósito de este trabajo es dual: en primer lugar, complementar la formación de los estudiantes, proporcionándoles conocimientos y herramientas prácticas para abordar de manera efectiva la evaluación de riesgos derivados de la contaminación atmosférica; en segundo lugar, contribuir al desarrollo futuro de la legislación en esta área, estableciendo un fundamento sólido para la incorporación de requerimientos específicos en torno a la evaluación y gestión de riesgos en procesos industriales.

Este enfoque educativo no solo beneficia a los estudiantes al dotarlos de habilidades y perspectivas avanzadas, sino que también tiene un impacto potencialmente significativo en la mejora y evolución de las regulaciones ambientales en México. Asimismo, busca fomentar una mayor conciencia y capacidad para abordar los riesgos asociados a los compuestos químicos liberados durante procesos industriales, impulsando así la protección ambiental y la salud pública en el país.

Metodología

Secuencia didáctica

Para abordar este tema en el aula, se utiliza el siguiente procedimiento:

Primero se proporciona un marco teórico en el análisis de riesgos. Se expone inicialmente que los tóxicos atmosféricos son contaminantes del aire que, incluso en pequeñas concentraciones, tienen el potencial de causar cáncer u otros daños adversos a la salud humana, así como efectos en el ambiente. Para identificarlos, se emplea la lista de sustancias tóxicas de la Junta de Recursos del Aire de California (CARB, 2022) y la del Congreso de Estados Unidos (House of Representatives, 2016).

En la parte de legislación, se revisan las normas oficiales mexicanas que establecen límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera de algunos tóxicos atmosféricos provenientes de industrias. Se destacan la NOM-040-SEMARNAT-2002, la NOM-098-

SEMARNAT-2002 y la NOM-166-SEMARNAT-2014, que se aplican a la industria del cemento (SEMARNAT, 2002), las instalaciones de incineración de residuos (SEMARNAT, 2004) y la fundición secundaria de plomo (SEMARNAT, 2015), respectivamente. Aunque la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente obliga a los establecimientos que realizan actividades altamente riesgosas a presentar una evaluación de riesgo ambiental, este instrumento solamente considera acciones en caso de derrames, fugas, incendios o explosiones (SEMARNAT, 2021). Por otra parte, la estimación de riesgos para la salud debido a los tóxicos atmosféricos emitidos por fuentes fijas no está contemplada en el marco regulatorio mexicano, por lo cual se revisa el documento referente a los estudios de riesgo e impacto ambiental (SEMARNAT, 2018).

Asimismo, se explica que el RETC es un registro que recopila las emisiones de sustancias listadas en la NOM-165-SEMARNAT-2013 (SEMARNAT, 2014) por parte de industrias de diversos sectores bajo jurisdicción federal, reportadas a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Posteriormente, se detalla el proceso de análisis de riesgos de la EPA (2024) que comprende los siguientes puntos:

Priorización de la evaluación de riesgo

Es un paso preliminar en la metodología que permite identificar si un proceso o contaminante requiere un estudio más exhaustivo, mediante una cuantificación que se realiza a través de puntajes para efectos cancerígenos y efectos crónicos o agudos no cancerígenos (Gratt, 1996).

La ecuación utilizada para obtener el puntaje de efectos cancerígenos ($S_{\text{cáncer}}$) es:

$$S_{\text{cáncer}} = \sum_c (Q_c)(URF_c)(RP)(1.7 \times 10^3) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Q_c = Emisión de la sustancia c (lb/año);

URF_c = Factor Unitario de Riesgo por inhalación ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)⁻¹;

RP = Factor de proximidad del receptor.

Mientras que el puntaje de efectos crónicos o agudos no cancerígenos ($S_{\text{no-cáncer}}$) se estima con:

$$S_{\text{no-cáncer}} = \sum_c \left(\frac{Q_c}{REL_c} \right) (RP)(150 \text{ ó } 1500) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Q_c = Emisión de la sustancia c con toxicidad crónica (lb/año) o aguda (lb/h);

REL_c = Nivel de exposición de referencia por inhalación crónica o aguda ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

RP = Factor de proximidad del receptor.

Se utiliza el valor de 150 para evaluar efectos crónicos ó 1500 para efectos agudos.

La emisión de la sustancia de interés se obtiene del RETC, mientras que los valores del Factor Unitario de Riesgo por inhalación (URF, por sus siglas en inglés), así como los niveles de exposición de referencia crónicos y agudos por inhalación (REL), se toman de la Tabla consolidada de valores para la evaluación de riesgos a la salud aprobada por la Oficina

de Evaluación de Riesgos para la Salud Ambiental de California y por la Junta de Recursos del Aire de California (CARB, 2022). Asimismo, el factor de proximidad (RP), que hace referencia a la distancia que existe entre la fuente y el receptor más cercano, puede consultarse en la Tabla 1.

TABLA 1. Factor de proximidad.
Fuente: Gratt, 1996.

Distancia (m)	< 100	100 a <250	250 a <500	500 a <1000	1000 a <1500	1500 a <2000	<2000
RP	1	0.25	0.04	0.011	0.003	0.002	0.001

Para evaluar el puntaje de efectos cancerígenos se considera que un valor superior a 100 indica que la empresa requiere una evaluación de riesgos detallada; entre 10 y 100 se clasifica como candidata potencial para evaluación, mientras que un puntaje menor a 10 sugiere que probablemente no sea necesario evaluarla. En cuanto al puntaje de efectos no cancerígenos, aquellos mayores a 10 señalan los establecimientos que requieren evaluación; entre 1 y 10 a los candidatos potenciales y menor a 1 a los que probablemente no se requiere su evaluación (Gratt, 1996).

Estimación de la concentración ambiental

A continuación, se presenta el procedimiento para la obtención de la concentración ambiental, utilizando la emisión reportada en el RETC (Q_c) y el factor de dilución (FD):

$$X = FD * Q_c \quad \text{Ecuación 3}$$

Esta concentración permite estimar la probabilidad de desarrollar cáncer a lo largo de la vida. Una forma de obtener el FD es emplear los datos de la Tabla 2, cuyos valores se encuentran en función de la altura de la chimenea y de la distancia desde el límite de la planta a la población más próxima. El FD también se puede conocer mediante el uso de modelos de dispersión.

Asimismo, los modelos de calidad del aire son útiles para pronosticar la concentración de los contaminantes de interés a partir de las emisiones, las características físicas de la fuente de emisión y las condiciones meteorológicas locales. Algunos ejemplos de estos modelos son CALPUFF (Scire et al., 2000), AERMOD (Perry et al., 2005), Hysplit (Stein et al., 2015), entre otros.

TABLA 2. Factores de dilución [(mg/m³)/(lb/d)].
Fuente: Gratt, 1996.

Altura chimenea (ft)	Distancia a la barda (m)								
	10-25	25-50	50-75	75-100	100-150	150-200	200-250	250-300	> 300
13-25	24.45	14.16	6.44	3.63	2.33	1.2	0.73	0.5	0.36
25-50	3.57	3.31	2.47	2.47	1.81	1.05	0.67	0.47	0.35
> 50	0.52	0.52	0.52	0.52	0.48	0.48	0.41	0.33	0.26

Caracterización del riesgo

Riesgo de cáncer

Para estimar el riesgo de cáncer ($R_{\text{cáncer}}$) por exposición a un tóxico atmosférico c , se utiliza la metodología de la EPA (2022) y de la Agencia de Protección Ambiental de California (CalEPA, 2015), mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$R_{\text{cáncer}} = \text{concentración} * URF_c \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde la concentración de la exposición está dada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el URF en $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$, por lo tanto, el riesgo es adimensional y es expresado como probabilidad de contraer cáncer. Para este cálculo, se asume que una persona permanece expuesta a los contaminantes durante 70 años (que representa el tiempo de vida promedio), y que la inhalación es la principal vía de exposición.

Otra forma de obtener la probabilidad de cáncer en el tiempo de vida (LCP, por sus siglas en inglés), es utilizar la siguiente ecuación (Gratt, 1996):

$$LCP_c = (Q_c)(FD)(URF_c)(MP_c) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

Q_c = Emisión de la sustancia c ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

FD = Factor de dilución;

URF_c = Factor Unitario de Riesgo por inhalación $(\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$;

MP_c = Factor multiruta de exposición.

El factor MP considera todas las vías de exposición (oral, absorción dérmica o inhalación), sin embargo, dado que únicamente se toma en cuenta la inhalación, al MP se le asigna el valor de 1. Con el FD definido y el MP igual a 1, la ecuación de LCP es equivalente al $R_{\text{cáncer}}$. (Ecuación 4).

Riesgo Total de Cáncer

El riesgo total de cáncer se estima cuando una persona se expone a más de un tóxico atmosférico. Éste se obtiene al sumar los riesgos generados por cada contaminante (EPA, 2018):

$$R_{\text{cáncer-total}} = \sum R_{\text{cáncer},c} = \sum_{c=1}^n \chi_c * URF_c \quad \text{Ecuación 6}$$

Generalmente, los riesgos de cáncer a partir de diferentes sustancias son tratados aditivamente porque muchos carcinógenos actúan a través de un mecanismo común de daño al ADN (CalEPA, 2015).

De acuerdo con Vega, et al. (2021), la EPA considera que los valores de $R_{\text{cáncer}}$ que se encuentra en un rango de 1×10^{-6} y 1×10^{-4} son aceptables, aunque Martín-Olmedo y colaboradores (2016) recomiendan una valoración específica en cada caso. En los ejemplos que se desarrollan en clases, se considera como un riesgo no aceptable a aquellos mayores a 1×10^{-6} , incluso para la exposición simultánea a varias sustancias.

Finalmente, se aborda la conversión del riesgo a métricas utilizadas en la comunicación del riesgo, de tal manera que los resultados puedan ser comprendidos fácilmente por cualquier persona. Tales métricas son (Gratt, 1996):

Carga de exceso de cáncer en la población

Este indicador señala el incremento en el número de casos de cáncer en la población como resultado de la exposición a las sustancias tóxicas en el ambiente. Se calcula de la siguiente forma:

$$CPR_{total} = R_{cáncer-total} * P_i \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde P_i se refiere al número de habitantes expuestos.

Pérdida de esperanza de vida (LLE)

Se calcula al multiplicar el $R_{cáncer}$ por la tasa de mortalidad que está en función de la edad, para obtener el número de días restados a la esperanza de vida:

$$LLE = (1.1 \times 10^6) R_{cáncer} * P_i \quad \text{para } R_{cáncer} \text{ menor a } 10^{-3} \text{ año}^{-1} \quad \text{Ecuación 8}$$

Incremento anual teórico en los casos de cáncer (IA)

Es el número de casos de cáncer durante el tiempo de vida dividido por la esperanza de vida promedio de un adulto:

$$IA = \frac{\text{Casos de cáncer por millón de habitantes}}{\text{Esperanza de vida promedio}} = \frac{R_{cáncer} * 10^6}{\text{Esperanza de vida promedio}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Riesgo de no cáncer

Para la caracterización del riesgo de efectos no cancerígenos se utiliza el Coeficiente de riesgo (HQ, por sus siglas en inglés), que se obtiene al dividir la concentración de exposición ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), por el REL de inhalación crónica o aguda (EPA, 2018):

$$HQ_c = \frac{\text{Concentración de la exposición}}{REL_{crónico \text{ o } agudo, c}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Para obtener el riesgo por exposición simultánea a múltiples contaminantes, se asume un efecto aditivo, y se estima el Índice de riesgo (HI, por sus siglas en inglés):

$$HI = \sum_{c=1}^n HQ_c \quad \text{Ecuación 11}$$

Un valor de HI mayor a 1 indica que existe la posibilidad de que la exposición produzca efectos adversos no cancerígenos (EPA, 2018).

En la Figura 1 se resume la secuencia de pasos que se acaban de describir.

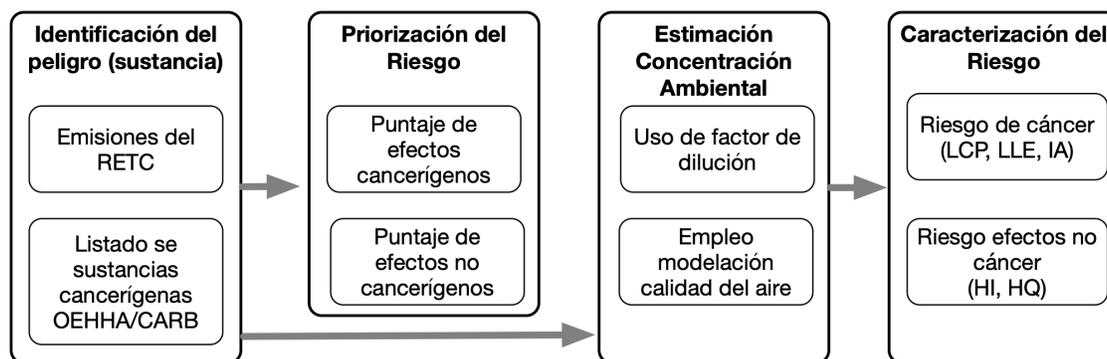


FIGURA 1. Proceso de evaluación de riesgos a la salud.

Para concluir, se solicita a los participantes leer los artículos relacionados con la evaluación de riesgo por tóxicos atmosféricos en México, donde se emplea la metodología de la EPA (Vega et al., 2021; Vega et al., 2022).

Este enfoque secuencial y detallado proporciona a los estudiantes una comprensión completa y estructurada del proceso de evaluación de riesgos asociados a contaminantes atmosféricos, lo que les permite aplicar estos conocimientos de manera práctica y eficiente en futuros estudios y en la comunicación efectiva de riesgos ambientales que incluye el cálculo de los índices utilizados en la evaluación y jerarquización de riesgos.

Estrategia para medir el aprendizaje

Para fortalecer el conocimiento, se lleva a cabo un ejercicio utilizando las ecuaciones mencionadas y la información del RETC. A través de este ejercicio, se estiman los riesgos asociados con las emisiones para identificar aquellas sustancias que representan riesgos significativos y requieren estudios más detallados, así como aquellas que no los requieren. En este caso, se emplea la evaluación sumativa, la cual se lleva a cabo mediante la elaboración de un proyecto final, que consiste en lo siguiente:

1. Desde la página del RETC¹ de la SEMARNAT, se obtienen los datos en la pestaña de “Resumen 2004-2018”.
2. Se selecciona un año y un estado utilizando los autofiltros de Excel. Se consideran todas las emisiones al aire, y en caso de que sean numerosas, se seleccionan por sector productivo.
3. Se obtienen los puntajes carcinogénicos y no carcinogénicos para cada uno de los compuestos, con base en los datos disponibles de la Tabla consolidada de valores para la evaluación de riesgos a la salud (es posible que no estén todos los del RETC).
4. Se elabora un informe que incluye: Portada, Introducción (abordando lo que se sabe, lo que no se sabe y lo que aporta este trabajo), Método, Resultados, Análisis de resultados, Conclusiones, Trabajo a futuro (identificando lo que falta y recomendaciones basadas en los resultados obtenidos) y Referencias.

Para la evaluación de los proyectos se consideran los siguientes criterios mediante la siguiente rúbrica:

1. Cumplimiento de los Requisitos del Proyecto (25 puntos):
 - El estudiante seleccionó un año y un estado de manera adecuada.
 - Se consideraron todas las emisiones al aire, o se seleccionaron por sector si eran numerosas.
 - Se obtuvieron los datos del RETC desde la pestaña de “Resumen 2004-2018”.
 - Se identificaron y utilizaron los puntajes carcinogénicos y no carcinogénicos disponibles para los compuestos relevantes.
2. Calidad del Informe (25 puntos):

¹ <http://sinat.semarnat.gob.mx/retc/retc/index.php> NOTA: Este enlace debe ser abierto en un navegador diferente a Google Chrome.

- La portada del informe está correctamente formateada e incluye la información necesaria.
- La introducción proporciona un contexto claro, identifica lo que se sabe, lo que no se sabe y lo que aporta el proyecto.
- El método utilizado para evaluar los riesgos se describe de manera detallada y comprensible.
- Los resultados se presentan de forma clara y se muestran los cálculos realizados.
- El análisis de resultados y las conclusiones se basan en los datos recopilados y son pertinentes para el objetivo del proyecto.
- Se proporciona una sección de trabajo futuro que identifica áreas de mejora y ofrece recomendaciones para futuras investigaciones.

3. Organización y Presentación (20 puntos):

- El informe está bien estructurado y organizado de manera lógica.
- Se utilizan títulos y subtítulos adecuados para cada sección del informe.
- La redacción es clara y precisa, y se evitan errores gramaticales y ortográficos.
- Se utiliza un formato coherente y profesional para el informe.

4. Profundidad del Análisis (20 puntos):

- El estudiante demuestra comprensión de los conceptos y metodologías utilizadas en la evaluación de riesgos.
- Se discuten los posibles impactos en la salud humana basados en los resultados obtenidos.
- Se sugieren recomendaciones específicas y viables para abordar los riesgos identificados.

Total de Puntos: 90 puntos

Escalas de Evaluación:

- **Excelente (90 puntos):** Cumplimiento sobresaliente de todos los criterios de evaluación, con una presentación clara, organizada y profunda del proyecto.
- **Bueno (80-89 puntos):** Cumplimiento satisfactorio de la mayoría de los criterios de evaluación, con algunos aspectos que podrían mejorarse en términos de profundidad de análisis o calidad de presentación.

- **Aceptable (70-79 puntos):** Cumplimiento parcial de los criterios de evaluación, con algunos aspectos importantes que necesitan mejorarse en términos de organización, claridad o profundidad de análisis.
- **Insuficiente (0-69 puntos):** No se cumplen satisfactoriamente los criterios de evaluación, con múltiples aspectos que requieren mejoras significativas en términos de contenido, presentación o comprensión del tema.

Este material y la evaluación se han aplicado en el posgrado en los semestres 2022-2 y 2023-2 y en licenciatura en el 2021-2, 2022-2 y 2023-2.

Otra estrategia para medir el aprendizaje ha sido el desarrollo de trabajos de tesis donde utilizan la metodología presentada con el fin de conocer los posibles impactos a la salud de diferentes sectores industriales.

Resultados

Esta metodología se aplica en los cursos de Protección Ambiental III de la carrera de Ingeniería Química y en el curso de Riesgos por Contaminantes Atmosféricos en el posgrado de Ciencias de la Tierra. Al evaluar el proyecto final, se observó que los alumnos adquieren los conocimientos y las habilidades necesarias para aplicar la metodología propuesta e identificar los contaminantes, así como las fuentes que requieren atención prioritaria.

En relación con los resultados de los casos de estudio abordados en las tesis, también se identificaron las sustancias y los emisores que representan un riesgo más alto. Específicamente, en el análisis de riesgo hecho para Querétaro correspondiente a 2004, se identificó una carga de exceso de cáncer en la población desde 7 hasta 1,140 casos probables de cáncer por millón de habitantes y una pérdida de esperanza de vida de 8 a 1,255 días (Rivera Domínguez, 2009). Además, al evaluar el riesgo en una empresa minera del estado de Puebla con información del RETC 2018, se estimaron hasta 25,500 casos de cáncer por millón de habitantes, debido principalmente a la inhalación de cromo (Vázquez Bautista, 2023). Y en otro estudio desarrollado en la región de Tula de Allende, Hidalgo, se utilizaron datos del RETC 2019, donde mediante el uso del modelo CALPUFF se obtuvieron las concentraciones de los contaminantes de interés. Se encontró que el Cr, Ni y benceno excedieron el nivel aceptable de riesgo de cáncer (Altúzar Villatoro, 2024).

Asimismo, otros casos estudiados utilizaron datos de concentración obtenidos a través de medición. En uno de ellos encontraron un índice de peligrosidad por exposición crónica a formaldehído (medido en 2002 y 2003) que superó el valor de referencia de 1, así como un riesgo de cáncer no aceptable, que dio lugar a la pérdida de esperanza de vida de 65 días en la Ciudad de México (Carmona Villavicencio, 2006). Otra tesis presentó la evaluación de riesgo por formaldehído, benceno y tolueno medidos en 2003 en dos sitios de la Ciudad de México, donde el número más alto de días restados a la esperanza de vida fue de 633 y hasta 576 casos de cáncer por millón de habitantes debido a benceno (Villarón Calderón, 2007). Por otra parte, se encontró un riesgo de cáncer total mayor al aceptable por benceno, tolueno, etilbenceno y xileno en 3 de 5 estaciones cuyo periodo de muestreo fue la segunda mitad de 2011. Nuevamente, el riesgo de cáncer correspondiente al benceno fue el más alto de todos los contaminantes estudiados (Martínez Catana, 2012).

Conclusión

De este trabajo se destaca la importancia de la evaluación de riesgos ambientales y a la salud, derivados de la contaminación atmosférica, especialmente en México, donde actualmente no se lleva a cabo este análisis de manera sistemática debido a la falta de inclusión en el marco regulatorio.

En la parte educativa y formativa, se comprobó que los estudiantes lograron desarrollar las competencias necesarias para implementar la metodología propuesta y reconocer los contaminantes, junto con las fuentes que representan un mayor riesgo. Además, se subraya la importancia de brindar formación y herramientas prácticas a los alumnos para abordar la evaluación de riesgos a la salud, lo que puede contribuir tanto a su desarrollo profesional como al avance de la legislación en esta área. Asimismo, la información generada por los estudiantes contribuye a que tomen conciencia de las afectaciones que las sustancias químicas liberadas a la atmósfera pueden causar en la salud humana y, por ende, en los ecosistemas. Este proceso fomenta el desarrollo de habilidades críticas y analíticas fundamentales para la gestión del riesgo y la mitigación de posibles impactos, no solo en la salud, sino también en el medio ambiente. Además, fortalece su capacidad para tomar decisiones informadas y éticas en el futuro.

Por otra parte, se resalta el empleo de herramientas como el RETC y la Tabla Consolidada de Valores de la Junta de Recursos del Aire de California para obtener datos relevantes que permiten realizar análisis de riesgos. No obstante, es necesario tomar en cuenta que las bases de datos del RETC puede contener información incompleta, ya que no todas las empresas reportan la totalidad de los tóxicos que llegan a emitir y además se desconoce la veracidad de los datos reportados. Adicionalmente, se hace evidente la necesidad de desarrollar metodologías, así como de actualizar y complementar la legislación ambiental mexicana para incluir la evaluación de riesgos por contaminantes atmosféricos emitidos por fuentes fijas, y así abordar de manera integral los impactos en la salud y en el ambiente.

Finalmente, el análisis de riesgos tiene como objetivo identificar los riesgos potenciales, no necesariamente para ser comprobados, sino con el fin de inducir el desarrollo de programas de mejora del desempeño ambiental de las industrias y, con ello, disminuir la probabilidad de las afectaciones a futuro.

Referencias

Altúzar Villatoro, F. (2024). *Identificación de riesgos por emisiones de sustancias tóxicas en la región de Tula, Hidalgo*[Tesis de maestría no publicada]. Universidad Nacional Autónoma de México.

California Environmental Protection Agency. (2015). *The air toxics hot spots program guidance manual for preparation of health risk assessments*. <https://oehha.ca.gov/media/downloads/crn/2015guidancemanual.pdf>

California Air Resources Board. (2022). *Consolidated table of OEHHA/ARB approved risk assessment health values*.<https://ww2.arb.ca.gov/es/resources/documents/consolidated-table-oehha-carb-approved-risk-assessment-health-values>

- Carmona Villavicencio, A. (2006). *Evaluación de riesgos de tóxicos atmosféricos: formaldehído en la Ciudad de México* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Tesiunam. <http://132.248.9.195/pd2006/0608249/Index.html>
- Environmental Protection Agency. (2018). *EPA's Air Toxics Screening Assessment* [Technical Report]. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-02/AirToxScreen_2018%20TSD.pdf
- Environmental Protection Agency. (2022). *Risk Assessment*. <https://www.epa.gov/risk>
- Environmental Protection Agency. (2024). *Conducting a Human Health Risk Assessment*. <https://www.epa.gov/risk/conducting-human-health-risk-assessment>
- Gratt, L. B. (1996). *Air toxic risk assessment and management: Public health risk from normal operations*. John Wiley & Sons.
- Giuliani, D., Mellado, D., y Lerner, J. E. C. (2021). Atmospheric Pollution. In *Air Pollution: Effects and Dangers* (p. 52). Nova Science Publisher, Inc.
- House of Representatives, C. (2016). *42 U.S.C. 7412 - Hazardous air pollutants*. In *U.S. Code: U.S. Government Publishing Office*.
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente. (2024, 24 de enero). *Diario Oficial de la Federación*. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- Martínez Catana, N. (2012). *Evaluación preliminar de riesgos a la salud por inhalación de tóxicos atmosféricos en la Ciudad de México de junio a diciembre de 2011* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Tesiunam. <http://132.248.9.195/ptd2012/agosto/0683558/Index.html>
- Martín-Olmedo, P., Carroquino Saltó, M. J., Ordóñez Iriarte, J. M., y Moya, J. (2016). *La evaluación de riesgos en salud. Guía metodológica. Aplicaciones prácticas de la metodología de evaluación de riesgos en salud por exposición a químicos*. https://www.researchgate.net/publication/311087127_La_Evaluacion_de_Riesgos_en_Salud_Guia_metodologica
- Perry, S. G., Cimorelli, A. J., Paine, R. J., Brode, R. W., Weil, J. C., Venkatram, A., y Peters, W. D. (2005). AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part II: Model performance against 17 field study databases. *Journal of Applied Meteorology*, 44(5), 694-708.
- Rivera Domínguez, C. H. (2009). *Evaluación de riesgo ambiental por la industria del estado de Querétaro en operación normal* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Tesiunam. <http://132.248.9.195/ptd2009/agosto/0646301/Index.html>
- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., y Yamartino, R. J. (2000). *A user's guide for the CALPUFF dispersion model*. Earth Tech, Inc, 521, 1-521.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-040-SEMARNAT-2002. Protección ambiental-Fabricación de cemento hidráulico-Niveles máximos de emisión a la atmósfera*. Diario Oficial de la Federación. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1236/1/nom-040-semarnat-2002.pdf>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004). *Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes*. Diario Oficial de la Federación. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1309/1/nom-098-semarnat-2002.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). *Norma Oficial Mexicana NOM-165-SEMARNAT-2013, Establece la lista de sustancias sujetas a reporte para el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*. Diario Oficial de la Federación. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6640/1/nom-165-semarnat-2013.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-166-SEMARNAT-2014, Control de emisiones atmosféricas en la fundición secundaria de plomo*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5378252&fecha=09/01/2015#gsc.tab=0
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018, 13 de agosto). *Estudios de riesgo e impacto ambiental*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/estudios-de-riesgo-e-impacto-ambiental>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). *Actividades consideradas como altamente riesgosas*. <https://acortar.link/obRxcl>
- Stein, A., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J., Cohen, M., y Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077.
- Vázquez Bautista, L. (2023). *Evaluación del riesgo por emisiones de tóxicos atmosféricos para México en 2018 a partir del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Tesiunam. <http://132.248.9.195/ptd2023/marzo/0837371/Index.html>
- Vega, E., López-Veneroni, D., Ramírez, O., Chow, J. C., y Watson, J. G. (2021). Particle-bound PAHs and Chemical Composition, Sources and Health Risk of PM_{2.5} in a Highly Industrialized Area. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(10), 210047. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210047>
- Vega, E., Ramírez, O., Sánchez-Reyna, G., Chow, J. C., Watson, J. G., López-Veneroni, D., y Jaimes-Palomera, M. (2022). Volatile Organic Compounds and Carbonyls Pollution in Mexico City and an Urban Industrialized Area of Central Mexico. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(6), 210386. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210386>
- Villarón Calderón, E. (2007). *Riesgo ambiental por contaminantes criterio y contaminantes peligrosos en dos sitios de la Ciudad de México* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Tesiunam. <http://132.248.9.195/pd2007/0620592/Index.html>