



**CADMIO ATMOSFÉRICO EN AMBIENTE URBANO IMPACTADO
POR INDUSTRIA METALÚRGICA NO FERROSA**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

que para obtener el título de
INGENIERO EN BIOQUIMICA

Presenta:

MARILYN JAQUELINE LEDEZMA ESPINOZA

No. De control: 171000033

Mazatlán, Sin., septiembre de 2022





Esta investigación se realizó en el Laboratorio de Isotopía Estable de Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlán, a cargo del Dr. Martin Federico Soto Jiménez. La tesis fue financiada con el proyecto FOP02-2021-06: 321540 “Proyecto de investigación e incidencia en materia de salud y ambiente para lograr justicia para La Laguna: intersecciones entre salud, ambiente y estatus socioeconómico”.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del Dr. Martin Federico Soto Jiménez director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: martin@ola.icmyl.unam.mx Si el permiso se otorga deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo de la siguiente manera:

Ledezma Espinoza, M.J. 2022. CADMIO ATMOSFÉRICO EN AMBIENTE URBANO IMPACTADO POR INDUSTRIA METALÚRGICA NO FERROSA. Tesis Licenciatura. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Mazatlán.

AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud al **Tecnológico Nacional de México campus Mazatlán**, gracias a cada docente quienes con su apoyo y enseñanzas contribuyeron a la base de mi vida profesional, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta.

Al **Laboratorio de Isotopía Estable de la Unidad Académica Mazatlán del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología** por permitirme realizar mi residencia y la tesis profesional en sus instalaciones, por darme la oportunidad de poner en práctica mis conocimientos adquiridos durante mi tiempo de estudiante.

Gracias a **Dios** por la vida de mis padres, porque cada día bendice mi vida con la hermosa oportunidad de estar y disfrutar al lado de las personas que más me aman, y que a la vez yo más amo.

A mis padres **Ángeles Lamadrid y Gerardo Barrón** por permitirme conocer a Dios y a su infinito amor. Por brindarme todo su apoyo en este largo camino, por el impulso y el sacrificio que han tenido para mí, por estar en los momentos difíciles de esta carrera. Gracias a mis padres por ser los principales motores de mis sueños y metas. Mamá gracias por todas las veces que me llevaste la comida hasta mi cuarto porque no podía salir hasta terminar mis tareas, por siempre atenderme y querer que estuviera concentrada en mi escuela. Papá, gracias por buscar que nunca me falte nada y por dar lo mejor de ti para ser un buen padre, los amo.

Al **Dr. Martín Federico Soto Jiménez** por compartir sus conocimientos, siempre contestar mis dudas de una manera rápida y eficaz, por darme tareas con grandes responsabilidades y confiar en mis capacidades, por ser un excelente ser humano, digno de respeto y admiración.

A la **Dra. Sarahi Roos Muñoz** por estar siempre dispuesta a revisar mis avances e indicarme que se puede mejorar, por estar pendiente a mis dudas y tenerme mucha paciencia.

A **Cinthya Jacobi** por trabajar de la mano en la interpretación de mi documento y compartir sus conocimientos y habilidades para la mejoría de esta tesis.

Quiero agradecer a mi tutor **Juan Antonio Cortés Ruiz**, quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

A mi familia:

A mis hermanos **Humberto, Ivone y Luis** por tener su confianza depositada en mí, por todas las aventuras y aprendizajes a lo largo de mi vida. Cada día aprendo más de ustedes, son una pieza clave en mi desarrollo como persona, los amo.

A mi novio **Antar** por todo el cariño y paciencia que me brinda en este camino. Te amo.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en la realización de esta tesis

¡GRACIAS A TODOS!.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis seres queridos por el amor, dedicación y paciencia que me brindaron para poder concluir esta tesis. En pocas palabras, su amor es simplemente único y se refleja cada día en mi vida.

A mis padres por ser los principales motores de mis sueños; por creer y confiar en mí. A mi madre por su disposición a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio, por apoyar sin titubear cada una de mis decisiones. A mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, por cada consejo y cada una de sus palabras que me guiarán durante toda mi vida.

MARILYN JAQUELINE LEDEZMA ESPINOZA

RESUMEN

La ciudad de Torreón, Coahuila, ha sido impactada por más de un siglo por la emisión de elementos potencialmente tóxicos, incluyendo cadmio, asociado al complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles S.A. de C.V. El objetivo de este estudio fue procesar una base de datos de niveles de cadmio atmosférico determinado durante 5 años en el ambiente urbano de Torreón, aledaño al complejo metalúrgico. Basado en los niveles de cadmio presente en el material particulado se evaluó el riesgo ambiental y a la salud humana por la exposición a cadmio a través de la inhalación, ingestión y contacto dérmico, de acuerdo con el Manual de Evaluación de Riesgos a la Salud Humana de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA). Las concentraciones de cadmio en el aire fueron más bajas en los meses de mayo, junio y septiembre (temporada de lluvias), variando desde 0.034 a 0.037 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y las máximas en diciembre y febrero (temporada fría y de sequía), con niveles desde 0.054 a 0.056 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Los niveles de cadmio fueron mayores en los lugares más cercanos a la fundidora. Los niveles de cadmio se encuentran por debajo de los límites establecidos por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pero son significativamente mayores a los niveles guía de la Organización Mundial de la Salud de 0.01-0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en áreas urbanas. Las concentraciones de cadmio dependen de la condición climática de la región y de la distancia y dirección de las estaciones de muestreo respecto al complejo metalúrgico. De acuerdo al análisis de riesgo a la salud se excedió el límite de ingesta establecido de 1.00E-03 mg de Cd/kg peso corporal por día, siendo la inhalación la principal vía de exposición al cadmio atmosférico para niños y adultos, seguido de la ingesta y la menor el contacto dermal. Las concentraciones de cadmio representan un riesgo cancerígeno para niños y adultos.

ABSTRACT

The city of Torreón, Coahuila, has been impacted for more than a century by the emission of metals such as cadmium, associated with the Met-Mex Peñoles S.A. of C.V. metallurgical complex. The objective of this work was processing a database of cadmium in PM in the air determined in the urban environment of Torreón, Coahuila to analyze the spatial and temporal variability of cadmium compare the results with respect to norms and guidelines of cadmium in the air, to national and international level and assess the environmental and health risk caused by atmospheric cadmium. In this work, the levels of cadmium present in the particulate material around the smelter were investigated. The environmental risk of this metal and the risk to human health due to exposure through inhalation, ingestion and dermal contact were evaluated, according to the Human Health Risk Assessment Manual. The concentrations of cadmium in the air were lower in the months of May, June and September (rainy season), with values that varied from 0.034-0.037 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The maximum concentrations were found in December and February (cold and dry season), with levels of 0.054 and 0.056 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The concentrations of cadmium in the health risk analysis presented a wide range of variation. According to the EPA, the established intake limit of 1.00E-03 mg of Cd/Kg p.c. was exceeded. day, with inhalation being the main route of exposure to atmospheric cadmium for children and adults, followed by dermal contact. The concentrations of cadmium in this study were found to be a carcinogenic risk for children and adults. Cadmium levels were higher in places closer to the smelter. Although cadmium levels are below the limits established by the Occupational Safety and Health Administration (OSHA), low or high concentrations of cadmium not only depend on the climatological situation of the Torreón area, if not, there is an effect of concentration depending on the distance from the smelter plant to the sampling stations.

ÍNDICE GENERAL

Página

RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE TABLAS	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	4
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
IV. HIPOTESIS	11
V. OBJETIVOS	12
5.1. Objetivo general.....	12
5.2. Objetivos específicos	12
VI. MARCO TEÓRICO	13
6.1. Material particulado.....	13
6.2. Elementos Potencialmente Tóxicos, con énfasis en Cadmio (Cd).....	14
VII. MATERIALES Y MÉTODOS	19
7.1. Área de estudio.....	19
7.2. Sitio de muestreo.....	20
7.3. Recolección de muestras	21
7.4. Procesamiento de muestras	21
7.5. Lectura y análisis de datos.....	22
7.6. Análisis de la variabilidad espacial y temporal de cadmio en el aire y su relación con la fuente de emisión	23
7.7. Comparación de los resultados de las concentraciones de cadmio con las normas y guías de cadmio en el aire a nivel nacional e internacional.....	24
7.8. Evaluación de riesgos de exposición de metales pesados en TSP	24
7.8.1. Factor de contaminación (CF, por sus siglas en inglés)	24

7.8.2.	Estimación de Riesgos Carcinogénicos de metales pesados en TSP.	28
7.9.	Análisis Estadístico de Datos	28
VIII.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
8.1.	Variabilidad temporal	29
8.2.	Variabilidad por sitio y distancia al complejo.....	31
8.3.	Variabilidad sobre la dirección.....	33
8.4.	Evaluación del Riesgo Ambiental y de Salud Causado por TSP.....	47
8.5.	Evaluación de Riesgos para la Salud (HHRA).....	56
8.5.1.	Riesgo potencial en infantes de 0 a 1 año de edad	56
8.5.2.	Riesgo potencial en niños de 2 a 5 años de edad	60
8.5.3.	Riesgo potencial en niños de 6 a 12 años de edad	64
8.5.4.	Riesgo potencial en adultos de 19 a 75 años de edad.....	68
8.5.5.	Riesgo cancerígeno	72
IX.	CONCLUSIONES.....	74
X.	RECOMENDACIONES	76
XI.	REFERENCIAS	77

INDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Localización geográfica de la ciudad de Torreón, Coahuila (H. Ayuntamiento de Torreón, 2021).....	19
Figura 2. Zona de muestreo en la ciudad de Torreón, Coahuila, alrededor del complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles.....	20
Figura 3. Proceso de digestión ácida de muestras de filtros.	22
Figura 4. HR-ICP-MS de sector magnético Finnigan MAT Element XR®	23
Figura 6. Concentración de Cd en material atmosférico ($\mu\text{g m}^{-3}$) vs la dirección ..	46

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Valores recomendados de la dosis de exposición diaria de TSP.	26
Tabla 2. Valores de referencia recomendados ($\text{mg kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$).....	27
Tabla 3. Límites máximos permisibles de Cd ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el aire.....	27
Tabla 4. Niveles de concentración de Cd en material atmosférico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) recolectado en la zona urbana de Torreón, Coahuila, en los años 2014-2018.	29
Tabla 5. Niveles de concentración de Cd en material atmosférico ($\mu\text{g m}^{-3}$) recolectado en la zona urbana de Torreón, Coahuila, en los años 2014-2018.	31
Tabla 6. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de enero en los años 2014-2018.	33
Tabla 7. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de febrero en los años 2014-2018.	35
Tabla 8. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de marzo en los años 2014-2018.	36
Tabla 9. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de abril en los años 2014-2018.....	37
Tabla 10. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de mayo en los años 2014-2018.....	38
Tabla 11. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de junio en los años 2014-2018.....	39
Tabla 12. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de julio en los años 2014-2018.....	40
Tabla 13. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de agosto en los años 2014-2018.....	41
Tabla 14. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de septiembre en los años 2014-2018.....	42
Tabla 15. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de octubre en los años 2014-2018.	43
Tabla 16. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de noviembre en los años 2014-2018.....	44

Tabla 17. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de diciembre en los años 2014-2018.....	45
Tabla 18. Factor de contaminación atmosférico en los años 2014-2018 de acuerdo a niveles naturales y límites propuestos y establecidos por la US EPA.	48
Tabla 19. Evaluación de riesgos para Cd en la salud de infantes de 0 a 1 año de edad respecto a la distancia de Met-Mex Peñoles en los años 2014-2018.....	57
Tabla 20. Evaluación de riesgos para Cd en la salud de infantes de 0 a 1 año de edad respecto a la época en los años 2014-2018.....	59
Tabla 21. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de niños de 2 a 5 años de edad respecto a la distancia de Met-Mex Peñoles en los años 2014-2018.....	61
Tabla 22. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de niños de 2 a 5 años de edad respecto a la estación del año en los años 2014-2018	63
Tabla 23. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de niños de 6 a 12 años de edad respecto a la distancia de Met-Mex Peñoles en los años 2014-2018.....	65
Tabla 24. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de niños de 6 a 12 años de edad respecto a la estación del año en los años 2014-2018	67
Tabla 25. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de adultos de 19 a 75 años que habita en los alrededores de Met-Mex Peñoles respecto al sitio de exposición en los años 2014-2018.....	69
Tabla 26. Evaluación de riesgos para Cd en la salud de adultos de 19 a 75 años de edad respecto a la estación del año en los años 2014-2018	71
Tabla 27. Riesgo de cáncer en la población expuesta (desde su nacimiento hasta la edad adulta) que habita en los alrededores de Met-Mex Peñoles en Torreón, Coahuila.	73

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico de una sociedad tiene que ver con el objetivo de alcanzar un alto nivel de satisfacción de las necesidades de las personas para mejorar su calidad de vida. A nivel mundial, en las últimas décadas se ha hablado de un desarrollo económico que también ha traído como consecuencia un fuerte impacto ambiental producto de la utilización de los factores de producción (Moran-Molina & Gonzaga-Añazco, 2017).

De este modo, la contaminación por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) como metales pesados y metaloides en recursos hídricos, suelos y aire comprometen a la seguridad alimentaria y salud pública a nivel global y local (Reyes *et al.*, 2016). Su presencia en el ambiente se debe a fuentes naturales y antropogénicas. Los EPTs se emplean y se liberan al ambiente en varios procesos industriales tales como la industria metalúrgica, la minería y la agricultura, y en la quema de combustibles fósiles. Estos contaminantes se caracterizan por su persistencia, bioacumulación, biotransformación y elevada toxicidad, todo esto hace muy difícil su degradación natural, razón por la cual se encuentran en los ecosistemas por largos periodos (Rodríguez-Heredia, 2017).

Los EPTs son un grupo de contaminantes ampliamente investigados y presentes en todas partes en el entorno urbano que se acumulan rápidamente y alcanzan niveles tóxicos. La construcción intensiva de infraestructura, el aumento de la densidad de vehículos y un cambio general en el estilo de vida, especialmente en los países en desarrollo, han aumentado las fuentes puntuales y difusas de la emisión de metales. Debido a su prevalencia, toxicidad y persistencia, los EPTs son motivo de especial preocupación en cualquier sistema ambiental. La investigación sobre EPTs en las áreas urbanas involucra identificar las fuentes probables de contaminación y su impacto en la salud humana y al ambiente urbano. La contaminación por EPTs representa probablemente la preocupación ambiental más investigada durante las últimas dos décadas (Kumar *et al.*, 2017).

Uno de los mayores problemas de nuestra era es la contaminación del aire, no solo debido a su impacto en el cambio climático, sino también por su impacto en la salud pública, debido al aumento de la morbilidad y la mortalidad. Entre los contaminantes causantes de enfermedades en los seres humanos se encuentra el material particulado (PM, por sus siglas en inglés). El PM son partículas de diámetro variable pero muy pequeño, que penetran en el sistema respiratorio por inhalación. El material particulado se clasifica en partículas suspendidas totales (PST), en 3 categorías: PM₁₀, PM_{2.5} (Polo-Bravo & Sulca-Quispe, 2018; Qi *et al.*, 2020) y PM_{0.1} (Traboulsi *et al.*, 2017). La composición y tamaño del PM determinará sus efectos en la salud, siendo más dañinas a medida que su tamaño disminuye (Hernández-Escamilla *et al.*, 2015; Cevallos *et al.*, 2017; Rychlik *et al.*, 2019; del Real *et al.*, 2021).

Cada vez es más común que los EPTs se encuentren en el aire incorporados en el PM proveniente de diferentes fuentes antropogénicas como plantas generadoras de energía, automóviles, y de actividades mineras y metalúrgicas (Polo-Bravo & Sulca-Quispe, 2018; Qi *et al.*, 2020). Se ha demostrado que el cuerpo humano acumula EPTs como plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), y arsénico (As) debido a la contaminación, en concentraciones que superan los límites máximos permisibles establecidos a nivel mundial. Lo anterior, debido al contacto dermal, ingesta e inhalación de PM, razón por la cual, se pueden ver afectados órganos vitales del cuerpo humano y presentar problemas respiratorios como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), y hasta sufrir cambios en la estructura genética del ADN (Polo-Bravo & Sulca-Quispe, 2018; Manisalidis *et al.*, 2020).

México es un país que destaca en la producción de minerales metálicos como el oro (Au), la plata (Ag), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn). De la diversidad en la localización minera, destaca el territorio del centro-norte del país. La actividad minera para su exploración y explotación demanda de diversas sustancias químicas y genera enormes cantidades de desechos, que de no ser correctamente manejadas, corren el riesgo de convertirse en agentes contaminantes del territorio

y de las comunidades donde se asientan los yacimientos de minerales (Vázquez-Ruíz, 2017).

Hoy en día, el procesamiento de minerales de galena (PbS) y esfalerita (ZnS) para la producción de Au, Ag, Bi, Cd, Pb y Zn, ocurre principalmente en el complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles, en la ciudad de Torreón en Coahuila. Este complejo inicio operaciones en 1901 y desde entonces es uno de los mayores productores de metales de México y del mundo. Met-Mex Peñoles es la cuarta planta metalúrgica más grande del mundo, principal productora de Ag en el mundo y la mayor de Latinoamérica (Martínez, 2012). Sin embargo, la emisión de Pb y otros EPTs por el complejo metalúrgico ha deteriorado la calidad del ambiente urbano y la salud de la población (Soto-Jiménez & Flegal, 2011a, b; Reyes *et al.*, 2016). En comparación con otros complejos metalúrgicos de otras partes del mundo (como Estados Unidos, Canadá y Europa), el control la emisión de EPTs en Met-Mex Peñoles se presentó años o décadas más tarde (Soto-Jiménez & Flegal, 2021). Sin embargo, a pesar de que en la fundidora se han realizado ajustes para controlar la emisión de contaminantes a la atmosfera, las concentraciones de Pb y de otros EPTs en el ambiente de Torreón aun representan riesgo para la salud pública(Soto-Jiménez & Flegal, 2021).

Debido al impacto que pueden generar los EPTs en el ambiente y en la salud de los habitantes que viven en las cercanías de fuentes de contaminación por metales, el objetivo de este proyecto fue evaluar la contaminación por cadmio atmosférico en el ambiente urbano de Torreón, Coahuila, impactado por la industria metalúrgica. Para tal propósito se empleó una base de datos de cinco años de mediciones en una red de monitoreo en la ciudad de Torreón, complementada por una estación de monitoreo y análisis de muestras a cargo del Laboratorio de Isotopía Estable y con el apoyo de la Universidad Autónoma de Coahuila, ubicada en el Centro de investigaciones Biomédicas en Torreón.

II. ANTECEDENTES

Entre los estudios internacionales sobre la presencia de metales en el aire podemos citar el realizado en China por Cheng *et al.* (2014), los cuales investigaron las fuentes antropogénicas de cadmio en este país. El cálculo de la estimación total del metal en el año 2009 fue de 743.77 t, de las cuales los procesos industriales y fuentes de combustión aportaron aproximadamente 56.6 y 43.4%, respectivamente. La fundición de metales no ferrosos, incluidos Cu, Pb y Zn, se ubicó como la fuente principal de cadmio y representó alrededor del 40.6% del total de la emisión. Esta contribución alta se debe al rápido crecimiento de la industria metalúrgica no ferrosa. De las emisiones de cadmio por la combustión del carbón se estimaron aproximadamente en 273.69 t, con una aportación del 36.8%. Se cree que el sector industrial es la principal fuente de la quema de carbón. Además, los resultados indican que las emisiones se distribuyeron principalmente entre las regiones del este, centro y sur de China.

Por otro lado, Armoa *et al.* (2016) obtuvieron en una zona minera de la ciudad de Itá, Paraguay, que los niveles de PM con diámetro aerodinámico de 0.3 y 0.5 μm se encontraban por debajo de los valores máximos permitidos por el Reglamento Nacional y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Mientras que el material particulado grueso superó ampliamente los valores permitidos por el Reglamento Nacional y la Organización Mundial de la Salud.

Asimismo, Blondet *et al.* (2019) realizaron un estudio sobre las partículas en el aire de una antigua zona minera en Cartagena-La Unión (sureste de España), con la finalidad de cuantificar el riesgo potencial para la salud humana. Para esto, monitorearon cuatro sitios: los principales relaves de la mina (Avenque), la zona urbana (La Unión), la zona agrícola (antigua zona minera) y un yacimiento de la costa mediterránea. La granulometría reveló un tamaño de partícula del polvo de alrededor de 15 μm , con las partículas más gruesas en el área urbana y las más delgadas en el sitio de relaves. Los resultados del contenido total de metales

mostraron una concentración de Zn, Pb, As y Cd de 2,549, 1,275, 68 y 7 $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{d}$, respectivamente, los cuales superan los valores máximos establecidos por la legislación europea en el ámbito minero.

Los cálculos de riesgo utilizando el contenido total de metales considerando un escenario residencial mostraron un riesgo aceptable para todos los sitios, excepto para los relaves mineros que presentaron un riesgo de cáncer y peligro no aceptable, principalmente debido a los contenidos totales de arsénico y plomo. Al considerar la fracción bioaccesible de arsénico y plomo, el riesgo disminuyó a valores aceptables, demostrando la sobreestimación (Blondet *et al.*, 2019).

Además, Zhang *et al.* (2018), recolectaron muestras de PM en Zhuzhou, provincia de Hunan, en China, desde diciembre de 2011 hasta enero de 2012. Esta ciudad ha sido afectada por la fundición de Pb y Zn. Los resultados indicaron que la concentración promedio de Cr, As, Cd y Pb en PM fue de $177.3 \pm 33.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $37.3 \pm 8.8 \text{ ng}/\text{m}^3$, $17.3 \pm 8.1 \text{ ng}/\text{m}^3$, $4.8 \pm 3.1 \text{ ng}/\text{m}^3$ y $141.6 \pm 49.1 \text{ ng}/\text{m}^3$, respectivamente. El tamaño de PM fue de 1.1 a 2.1 μm , seguida de 9 a 10 μm . El tamaño de las PM que contenían As, Cd y Pb fue similar a la masa de las PM, con picos observados en el rango de 1.1 a 2.1 μm y rangos de 9 a 10 μm , mientras que, para Cr, se observó un tamaño que iba de 4.7 a 5.8 μm . El PM con un 64.7%, As con 72.5%, Cd con 72.2% y Pb con 75.8% se asociaron con las partículas finas de debajo de 2.1 μm . Mientras que Cr con 46.6% se asoció con el modo grueso. Los resultados mostraron que la presencia de As, Cd y Pb en PM son frecuentes en áreas afectadas por la fundición de minerales de Pb y Zn.

En México, Meza-Figueroa *et al.*, (2007) determinaron el contenido de Ni, Cr, Zn, Cd, Co, Ba, V, Pb, Fe y Cu en el polvo sedimentado del techo de 25 escuelas primarias ubicadas en Hermosillo, Sonora, en el norte de México. Los resultados revelaron que los techos que se encontraban en el área sur contenían concentraciones de metales pesados más altas que los del área centro-norte. El nivel promedio de Cd en el polvo exterior fue 5.65 mg/kg en la zona sur, mientras

que en la zona centro-norte el promedio de Cd fue de 2.83 mg/kg. En techos cercanos de áreas industriales se encontraron concentraciones elevadas de Zn (2012 mg/kg), Pb (101.88 mg/kg), Cr (38.13 mg kg⁻¹) y Cd (28.38 mg/kg). Las fuentes principales de metales fueron dos: 1) Industriales combinadas con el tráfico (Pb, Cd, Cr y Zn) y 2) Naturales (Fe, Co y Ba). En conclusión, la distribución de los metales pesados en el polvo no parece estar controlada únicamente por la topografía de la ciudad, sino también por la ubicación de las fuentes de emisión.

Aunque el PM y los EPTs sean emitidos principalmente desde zonas urbanas o industriales, pueden recorrer grandes distancias y llegar a lugares muy lejanos. De igual manera, ambos tipos de contaminantes pueden llegar a los suelos por deposición atmosférica, generando contaminación y representando un problema ambiental (Luo *et al.*, 2019). Al respecto, San Francisco del Oro, Chihuahua, es un área de confinamiento de desechos mineros donde se ha estudiado la concentración de Pb, Cd, Zn y As. En este trabajo se observó que los EPTs se encontraban en mayor concentración en sitios cercanos a los jales y que su concentración disminuía conforme la distancia de ellos. Todos los elementos sobrepasaron los rangos establecidos por las agencias internacionales. La extracción minera generó disturbios al medio ambiente e hizo que los suelos presentaran limitaciones físicas, químicas y biológicas para el establecimiento de vegetación, y también provocó riesgos a la salud (Puga *et al.*, 2006).

Un caso similar fue reportado Flores-Ramírez *et al.* (2012), quienes encontraron valores extremos de Pb en sangre en las comunidades infantiles que habitaban en áreas cercanas a las metalurgias Ávalos en Chihuahua; Morales en San Luis Potosí (SLP); zona alfarera en La Trinidad, Tlaxcala; y Cedral en SLP, los cuales correspondieron a 32, 31, 52 y 22 µg/dL, respectivamente. También observaron una correlación positiva significativa entre los valores de Pb en polvo y Pb en sangre en todos los sitios de estudio. Estos sitios son un ejemplo de los riesgos relacionados con la exposición al Pb; por consiguiente, los autores sugieren un programa nacional

de salud pública dirigido a reducir la exposición a este metal en poblaciones vulnerables.

Asimismo, Corona-Sánchez *et al.* (2021), estudiaron a la región de Zimapán, Hidalgo, México, la cual está siendo afectada por la presencia de PM proveniente de la minería. De tal manera que en este lugar se han reportado partículas en el aire en el rango de 21.2 a 64.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$, y entre 23.6 y 80.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . El orden de la concentración de los EPTs en ambos tamaños de PM fue $\text{As} > \text{Zn} > \text{Fe} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Cd}$. La concentración bioaccesible de los EPTs fue muy alta y representó un elevado porcentaje de la concentración en el aire. Por ejemplo, en la concentración bioaccesible pulmonar fue 10 al 37% para Pb, y en la concentración bioaccesible gástrica 8 y 6% para As. Debido a estos resultados, los autores mencionan que existe una necesidad urgente de establecer una regulación ambiental de la concentración bioaccesible de los contaminantes provenientes de PM, que son desprendidas de los relaves de minas (Corona-Sánchez *et al.*, 2021).

Por otro lado, Cerón-Bretón *et al.* (2022), encontraron en León, Guanajuato, durante la época de lluvias, que las concentraciones PM_{10} superaron el límite máximo permitido establecido por las Normas Mexicanas y la Organización Mundial de la Salud, constituyendo un riesgo potencial para la salud de la población. La caracterización química y morfológica mostró que el Fe fue el metal más abundante (0.986 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido por el Zn (0.243 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), debido a que estos metales están relacionados con la corteza. Se encontraron concentraciones más bajas para Cu (0.140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Cd (0.119 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn (0.070 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Co (0.043 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). El análisis meteorológico mostró que las fuentes ubicadas en el suroeste (SW) y noreste (NE) del sitio de muestreo (parques industriales e instalaciones relacionadas con la extracción de metales y minerales) influyeron en las concentraciones de los metales que se midieron. Los factores de enriquecimiento mostraron que todos los niveles de los metales estaban muy influenciados por la actividad antropogénica.

En Torreón, Coahuila, se encuentra Industrias Peñoles, la cual es responsable de la emisión 23,350-27,580 t de Pb en los últimos 118 años. La mayor parte de esta

contaminación (63 a 75%) se produjo cuando había muy poco control de esta emisión (antes de 1960) (Soto-Jiménez & Flegal, 2021). García-Vargas *et al.* (2007), encontraron en suelos de casas habitación de un vecindario localizado a 250 m de la fundidora Met-Mex Peñoles en Torreón, Coahuila, que las concentraciones de As, Cd y Pb superaban en uno y hasta más de dos órdenes de magnitud los niveles considerados como aceptables para sitios contaminados, incrementando los riesgos de efectos adversos a la salud en las poblaciones vecinas.

Existen otros estudios realizados en la zona que muestran la contaminación relacionada con la fundidora. Por ejemplo, Soto-Jiménez & Flegal (2011b), encontraron en Torreón concentraciones promedio de Cd y Zn en polvo de calle de 12.6 µg/g y 2,451 µg/g, respectivamente, dentro de un área >100 km² alrededor de la fundidora de las Industrias Peñoles. Además, observaron que las concentraciones de los metales disminuían conforme aumentaba la distancia a la fundidora.

De igual manera, Soto-Jiménez & Flegal (2011a), observaron concentraciones de Pb en suelos y polvo exterior que varió entre 130 a 12,050 y de 150 a 14,365 µg/g, respectivamente. Al mismo tiempo, que las concentraciones fueron mayores cerca de la fundidora, con los niveles más altos en dirección del viento predominante. Asimismo, encontraron 11 ± 5.3 µg/dL de Pb en sangre de 34 niños de 2 a 17 años de edad que vivían dentro de un área de 113 km² alrededor de las Industrias Peñoles. Esta concentración es de 13-14 veces más alta que 1.9 µg/dL de Pb en sangre observada en niños de 1 a 5 años de edad que radican en Estados Unidos. A pesar de que en la fundidora se han realizado ajustes para controlar la emisión de contaminantes a la atmósfera, las concentraciones de Pb en sangre en niños de Torreón muestran que las emisiones aun representan un riesgo.

Aunque en la actualidad la emisión de Pb por el complejo ha disminuido en más de un orden de magnitud respecto a los tiempos anteriores (≤ 12.6 t/año), la tasa de emisión de Pb es de 2 a 3 veces más alta que la establecida por la USEPA y,

además, aún constituye una amenaza potencial para la salud de los habitantes en Torreón (Soto-Jiménez & Flegal 2021).

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presencia EPTs en el aire puede representar un riesgo para la salud. A pesar de que la fundidora Met-Mex Peñoles ha realizado modificaciones para tener más control de sus emisiones, la contaminación que genera en Torreón, Coahuila, sigue representando un problema para los habitantes que residen alrededor de ella. Por lo tanto, es necesario conocer los niveles de concentración de Cd en el aire. En este estudio se revisó una base de datos de 5 años para analizar la variabilidad espacio-temporal de Cd en el aire y establecer la relación de este metal con la fundidora y evaluar el riesgo ecológico potencial que representan en el área impactada.

IV. HIPOTESIS

En distintos estudios anteriores se ha demostrado que existe mayor riesgo de contaminación en los sitios cercanos a emisiones de materiales peligrosos. La concentración de cadmio en el ambiente urbano de Torreón, Coahuila, disminuye con la distancia a la fundidora Met-Mex Peñoles y aún representa un riesgo ecológico potencial y de salud pública.

V. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Evaluar la contaminación por Cd atmosférico en el ambiente urbano de Torreón, Coahuila, impactado por la industria metalúrgica, empleando una base de datos de 5 años de mediciones en una red de monitoreo en la ciudad de Torreón, complementada por una estación de monitoreo y análisis de muestras a cargo del Laboratorio de Isotopía Estable y con el apoyo de la Universidad Autónoma de Coahuila, ubicada en el Centro de investigaciones Biomédicas en Torreón.

5.2. Objetivos específicos

1. Procesar una base de datos de cadmio en PM en el aire determinada en el ambiente urbano de Torreón, Coahuila, impactado por la industria metalúrgica no ferrosa.
2. Analizar la variabilidad espacial y temporal de cadmio en el aire del ambiente urbano de Torreón, Coahuila
3. Determinar la relación de la presencia de cadmio en el aire con la distancia y dirección a Met-Mex Peñoles.
4. Comparar los resultados respecto a normas y guías de cadmio en el aire, a nivel nacional e internacional.
5. Evaluar el riesgo de exposición a la salud por cadmio.

VI. MARCO TEÓRICO

6.1. Material particulado

El término material particulado (PM, por sus siglas en inglés) se utiliza para definir una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, que tienen baja presión de vapor en el aire y tamaños inferiores a 0.01-100 μm y mayores. Está compuesto por cualquier tipo de partícula (orgánica o inorgánica) incluyendo polvo, suciedad, hollín o humo. Algunas de estas partículas son lo suficientemente grandes como para ser detectadas a simple vista, pero otras son muy pequeñas y solo pueden detectarse con una tecnología precisa, como un microscopio electrónico (Sampler, 1999; del Real *et al.*, 2021).

La composición del PM determinará sus efectos sobre la salud; de tal manera que las partículas antropogénicas tienden a ser más dañinas que las naturales. Estas partículas se dividen en tres categorías en función de su diámetro: partículas gruesas (PM_{10}) con un diámetro entre 2.5 y 10 μm ; partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) con un diámetro inferior a 2.5 μm ; y las partículas ultrafinas ($\text{PM}_{0.1}$), con un diámetro menor a 0.1 μm (Hernández-Escamilla *et al.*, 2015; Cevallos *et al.*, 2017; Rychlik *et al.*, 2019). A medida que disminuye el diámetro de las partículas, aumenta el riesgo de daño en un organismo, tanto debido a las diferencias en la composición (las emisiones primarias de los sitios industriales y el tráfico producen principalmente $\text{PM}_{2.5}$) como también porque las partículas más pequeñas pueden penetrar más en los pulmones (del Real *et al.*, 2021).

Además, las partículas finas y ultrafinas pueden incorporarse al torrente sanguíneo a través de los capilares alveolares provocando inflamación pulmonar (Fiordelisi *et al.*, 2017). Asimismo, el PM induce respuestas inflamatorias e inmunes, estrés oxidativo, mutagenicidad y cáncer, variabilidad de la frecuencia cardíaca, enfermedades neurológicas y cambios en la expresión génica (del Real *et al.*, 2021). *In vitro* se ha observado que la exposición de queratinocitos de ratones al PM

incrementa la expresión del MMP-1 mRNA y la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), así como citotoxicidad dependiente de la concentración. *In vivo*, el PM en ratones penetra en los folículos pilosos y genera engrosamiento e inflamación dérmica con infiltración de neutrófilos (Jin *et al.*, 2018). En niños se ha observado que la exposición al PM en el aire en la edad temprana se asocia con la presencia de enfermedades respiratorias y asma (Rychlik *et al.*, 2019).

6.2. Elementos Potencialmente Tóxicos, con énfasis en Cadmio (Cd)

Los Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) son ampliamente reconocidos como componentes tóxicos en el PM del aire (Yuan *et al.*, 2019). Dentro de los EPTs se encuentran los metales, no metales y metaloides (Hooda *et al.*, 2010). Algunos de estos EPTs, sin ninguna función biológica conocida y tóxicos a cualquier nivel de concentración, son el As, antimonio (Sb), Cd, Pb, Hg y talio (Tl) (Soto-Jiménez & Flegal, 2011a; Liu *et al.*, 2020). Estos elementos al ser acumulados en los tejidos de los organismos tienen el potencial de causar daño, incluso a bajas concentraciones. Existen otros EPTs, que se consideran esenciales por tener alguna función conocida en seres vivos, pero pueden causar problemas de toxicidad cuando se sobrepasan los umbrales de concentración requeridas. Por ejemplo, el Zn es un elemento esencial requerido a bajas concentraciones, pero la exposición a altas concentraciones puede causar calambres estomacales, anemia y cambios en los niveles del colesterol, o una enfermedad llamada fiebre por vapores metálicos debida a la inhalación de niveles altos del metal (Soto-Jiménez & Flegal, 2011b).

Los EPTS se consideran tóxicos cruciales del medio ambiente, ya que además de ser muy tóxicos son persistentes, fáciles de acumular y no degradables. La contaminación por EPTs incluye fuentes naturales, como la ruptura de rocas que contienen metales, la erupción de volcanes y ciertas actividades humanas como el aumento de la urbanización, el establecimiento de industrias y los procesos de fundición y extracción. Los peligros drásticos para la salud son causados por la

acumulación de EPTs letales en la biota que representan una amenaza para cada nivel trófico. Tales metales tóxicos incluyen Cu, Ni, As, Pb, Cd, etc., que se transfieren de un nivel trófico a otro y, por lo tanto, permanecen persistentes en la cadena alimentaria y afectan negativamente la salud de los seres vivos (Pujari & Kapoor, 2021).

La toxicidad de los EPTs depende principalmente de su estado relativo de oxidación, que es responsable de los efectos fisiológicos tóxicos. Cuando estos metales entran en los organismos vivos, se combinan con proteínas, enzimas y moléculas de ADN, forman compuestos biotóxicos altamente estables, alterando así el correcto funcionamiento del organismo y causando alteración de sus reacciones bioquímicas (Mishra *et al.*, 2019).

El elemento Cd es un metal suave y de color blanco plateado, que se encuentra de forma natural en la corteza terrestre. Por lo general, no se encuentra en el ambiente como un metal puro, sino como un mineral combinado con otros elementos como el O₂ (óxido de cadmio), el Cl (cloruro de cadmio) o el sulfuro (sulfato o sulfuro de cadmio, ATSDR, 1999). Es un elemento tóxico que no todos los organismos vivos requieren. Se libera al medio ambiente a través de diversas actividades naturales y antropogénicas afectando así a las plantas, los alimentos y a los seres humanos. Los diferentes tipos de alimentos pueden tener diferentes niveles de Cd, como las verduras de hoja verde, pescado y carne (Hayat *et al.*, 2019).

Este metal es relativamente barato, ya que se trata de un subproducto del procesamiento de metales más valiosos, como el Zn y el Cu. Aunque se le ubica entre los más peligrosos, de acuerdo a la Agencia Estadounidense para el Registro de Sustancias Tóxicas, sus aplicaciones son diversas, entre las cuales se encuentran la galvanoplastia, la galvanostegia y la galvanización, así como su uso en plásticos, pigmentos para crear tintes, pinturas, y cerámica, y en baterías de Ni y Cd, esto debido a su gran resistencia a la corrosión y a sus propiedades electroquímicas (Stellman, 2001; Pérez-García & Azcona-Cruz, 2012).

El Cd es más abundante en la naturaleza en la forma de óxidos complejos, sulfuros y carbonatos en el Zn, el Pb y las menas de Cu. En raras ocasiones se encuentra en grandes cantidades como cloruros y sulfatos. Los compuestos de Cd se encuentran a menudo en pequeñas partículas en el aire o adheridos a ellas. La mayoría de la gente no puede oler ni percibir el Cd en el aire o el agua, porque éste no tiene un olor o sabor característico. Los suelos y las rocas lo contienen en diversas cantidades, generalmente pequeñas, aunque a veces se puede encontrar en cantidades más grandes (por ejemplo, en algunos combustibles fósiles o fertilizantes). El Cd que se encuentra en pequeñas partículas o adherido a ellas puede ingresar al aire y viajar grandes distancias antes de regresar a la tierra como polvo, lluvia o nieve (ATSDR, 1999). Las principales fuentes de exposición al Cd en la población son la comida y el cigarro, aunque también puede darse a través de líquidos, ya sea por las cañerías que contienen Cd en sus soldaduras o por el agua que ha sido contaminada por las fábricas que tiran sus desechos a ríos (Stellman, 2001; Pérez-García & Azcona-Cruz, 2012).

Los datos epidemiológicos sugieren que la exposición al Cd ocupacional y ambiental puede estar relacionada con varios tipos de cáncer, incluidos el de mama, pulmón, próstata, nasofaringe, páncreas y riñón (Genchi *et al.*, 2021). Se ha informado que la exposición crónica al Cd está asociada con osteoporosis y enfermedades renales, y cardiovasculares (Ghizal *et al.*, 2019; Genchi *et al.*, 2021). Algunas de las exposiciones elevadas de Cd pueden ocurrir en personas que viven cerca de sitios de desechos peligrosos o fábricas que liberan Cd al aire, y personas que trabajan en la industria de refinerías de metales. Se ha observado que las implicaciones de los metales pesados en la salud de los niños son más graves en comparación con los adultos (Ghizal *et al.*, 2019). Las consecuencias nocivas de este elemento sobre la salud de los niños incluyen retraso mental, trastornos neurocognitivos y del comportamiento, así como problemas respiratorios (Yang-Fei & Massey-Yaw, 2019).

El Cd puede cambiar de forma en el cuerpo, pero a la vez permanecer en el cuerpo por mucho tiempo (años, ATSDR, 1999). Su permanencia en el cuerpo extremadamente larga (de 20 a 30 años en humanos) y la baja tasa de excreción del mismo, provocan su almacenamiento, predominantemente en los tejidos blandos (hígado y riñones) con una diversidad de efectos tóxicos como nefrotoxicidad, hepatotoxicidad y toxicidades endocrinas y reproductivas. También se ha reportado una neurotoxicidad dependiente de Cd relacionada con enfermedades neurodegenerativas, como las enfermedades de Alzheimer y Parkinson, esclerosis lateral amiotrófica y esclerosis múltiple. El riesgo potencial de daños a la salud depende de la forma del Cd que esté presente, la cantidad retenida por el organismo y si esta sustancia fue ingerida o inhalada (ATSDR, 1999).

La absorción gastrointestinal del Cd ingerido es aproximadamente de 2 a 6% en condiciones normales. Las personas que poseen pocas reservas de Fe en su organismo, lo que se traduce en una baja concentración de ferritina en el suero, pueden presentar una absorción de Cd mucho mayor, de hasta un 20% de la dosis administrada. Además, se pueden absorber cantidades significativas de este metal por vía pulmonar, como consecuencia de la inhalación del humo de tabaco o por la exposición ocupacional al polvo de Cd atmosférico. Se calcula que la absorción pulmonar del polvo de Cd respirable inhalado es del 20 al 50%. Tras la absorción, ya sea por vía digestiva o respiratoria, el Cd se transporta al hígado y riñón, donde se inicia la producción de una proteína de bajo peso molecular que se une al Cd, las metalotioneínas, que son proteínas inducibles por cadmio que protegen a la célula al unirse a los iones tóxicos del metal (Stellman, 2001; Genchi *et al.*, 2021).

A nivel celular, el Cd afecta la proliferación, diferenciación, apoptosis y otras actividades celulares. Entre todos estos mecanismos, la interferencia dependiente de Cd en los mecanismos de reparación del ADN, así como la generación de las sustancias reactivas al oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), parecen ser las causas más importantes de su toxicidad celular (Branca *et al.*, 2018). El estrés oxidativo inducido por este xenobiótico puede ser uno de los mecanismos

responsables de varias enfermedades hepáticas y renales. El daño de las mitocondrias es altamente plausible dado que estos orgánulos juegan un papel crucial en la formación de ROS y se sabe que se encuentran entre los objetivos intracelulares clave para el Cd. Cuando las mitocondrias se vuelven disfuncionales después de la exposición al Cd, producen menos energía (ATP) y más ROS. Estudios recientes muestran que el Cd induce diversos cambios epigenéticos en células de mamíferos, provocando riesgos patógenos (Genchi *et al.*, 2021).

Además, la inhalación de compuestos de Cd en concentraciones en el aire superiores a 1 mg/m³ durante 8 h o en concentraciones superiores durante períodos más cortos puede producir una neumonitis química y, en los casos graves, edema pulmonar. Generalmente, los síntomas aparecen entre 1 y 8 h después de la exposición y son similares a los de la gripe o la fiebre por humos de metales. Los síntomas más graves de la neumonitis química y del edema pulmonar pueden tener un período de latencia de hasta 24 h. El fallecimiento puede sobrevenir después de cuatro o siete días (Stellman, 2001).

VII. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Área de estudio

El área contemplada en este estudio, es el municipio de Torreón, que se localiza en la parte oeste del sur del estado de Coahuila, en las coordenadas 103°26 '33" longitud oeste y 25°32 '40" latitud norte, a una altura de 1,120 m sobre el nivel del mar (Figura 1). Limita al norte y al este con el municipio de Matamoros; al sur y al oeste con el estado de Durango. Se localiza a una distancia aproximada de 265 km de la capital del estado (H. Ayuntamiento de Torreón, 2021). La población total de Torreón en 2020 fue 720,848 habitantes, siendo 51.2% mujeres y 48.8% hombres. Los rangos de edad que concentraron mayor población fueron 15 a 19 años (60,741 habitantes), 20 a 24 años (60,416 habitantes) y 10 a 14 años (59,758 habitantes). Entre ellos concentraron el 25.1% de la población total (Censo de Población y Vivienda, 2020).



Figura 1. Localización geográfica de la ciudad de Torreón, Coahuila (H. Ayuntamiento de Torreón, 2021).

El clima en el municipio es de subtipos secos semicálidos; la temperatura media anual es de 20 a 22°C y la precipitación media anual se encuentra en el rango de los 100 a 200 mm en la parte noreste, este y suroeste, y de 200 a 300 en la parte centro-norte y noroeste, con régimen de lluvias en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y escasas en noviembre, diciembre, enero, febrero

y marzo. Los vientos predominantes tienen dirección sur con velocidades de 27 a 44 km/h. La frecuencia de heladas es de 0 a 20 días y granizadas de 0 a 1 día en la parte norte-noroeste, sur-oeste, y de uno a dos días en la parte sureste (H. Ayuntamiento de Torreón, 2021).

7.2. Sitio de muestreo

En este estudio se establecieron 14 estaciones de muestreo en el área urbana de Torreón, Coahuila (Figura 2). Se consideró un radio de colecta que varió desde 0.5 a 8 km en todas direcciones alrededor del complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles.

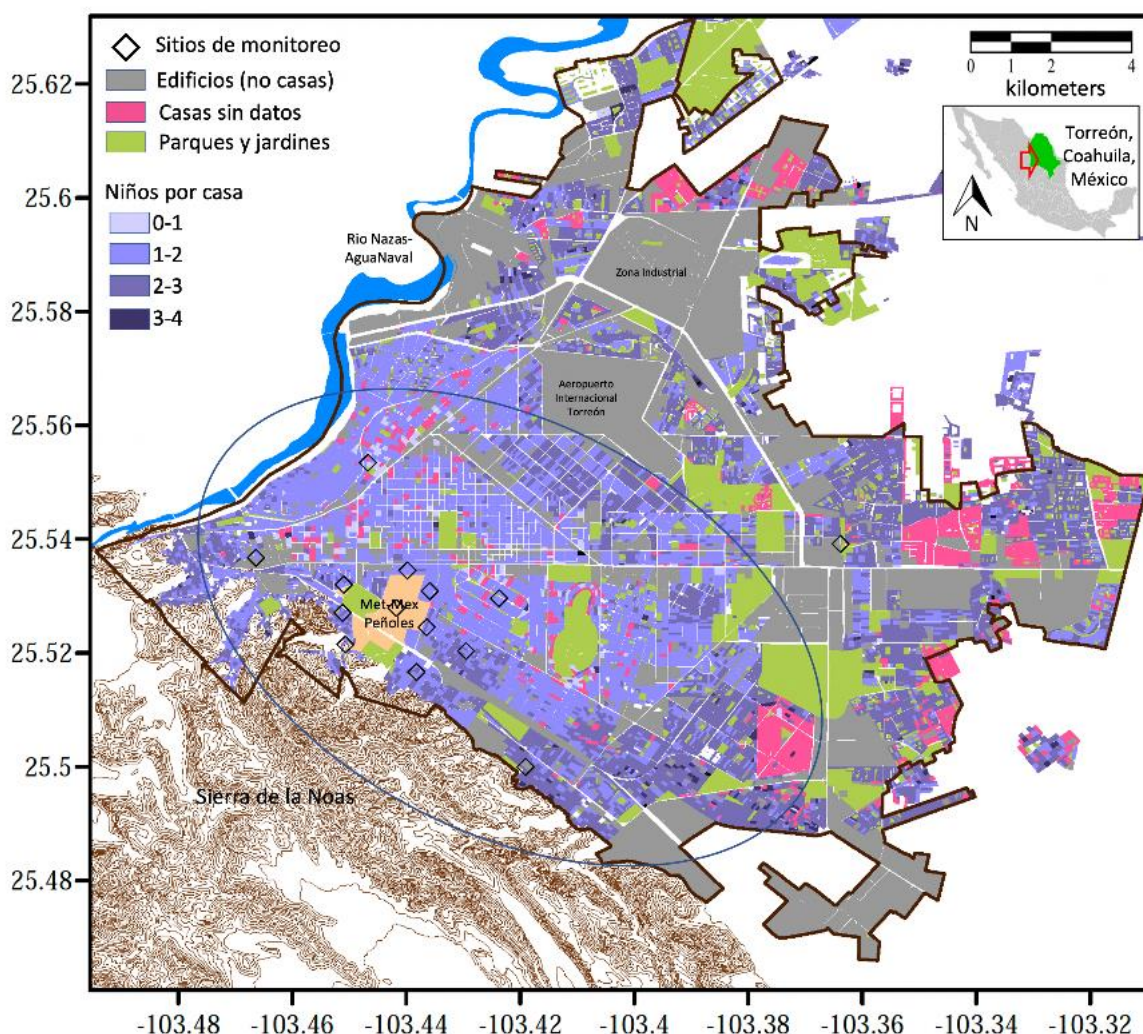


Figura 2. Zona de muestreo en la ciudad de Torreón, Coahuila, alrededor del complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles.

7.3. Recolección de muestras

Las muestras fueron recolectadas en la red de monitoreo operados por Met-Mex Peñoles y los análisis de PST y de metales incluyendo As, Cd y Pb, fueron realizados por la misma empresa. No se tiene evidencia de auditoria externa. Basado en la revisión de las bases de datos, se observan inconsistencias en la toma de muestras y/o falta de datos. De manera independiente y complementaria, en este estudio se operó una estación de monitoreo de la calidad del aire para las mediciones diarias de las concentraciones de partículas en el ambiente. Las muestras recolectadas se usaron para el análisis de metales en el aire.

La estación de monitoreo de la calidad del aire se instaló en el techo del CIB-UAC (25.5391°N, -103.4376°W; 5 m sobre el nivel del suelo, altitud media sobre el nivel del mar 1.127 m; 1.42 km al norte de la pila de fundición principal del complejo metalúrgico). Esta estación de monitoreo está equipada con muestreadores de aire de alto volumen para recolectar partículas en los papeles de filtro de cuarzo de 4" de diámetro (precalcinados a 550 °C durante 24 h), pesados antes y después del muestreo para determinar las concentraciones de masa de TSP, PM₁₀ y PM_{2.5}. Un controlador de flujo volumétrico controlaba las tasas de flujo (p. ej., con una tasa de bombeo de 0,25 l s⁻¹ y volúmenes de aire muestreados de 12 a 30 m³). Los filtros se pesaban con una semimicrobalanza Sartorius (82 g de capacidad, 0.00001 g de legibilidad) al 50% de humedad y 22±1°C.

7.4. Procesamiento de muestras

Las muestras de PM en los filtros ambientales colectadas de la estación de monitoreo de la calidad del aire ubicada en el CIB-UAC se procesaron en el Laboratorio de Isótopos Estables del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Académica Mazatlán. Se usaron campanas con filtros de aire clase 1000, reactivos de alta pureza (grado metal traza) y agua (18 MΩ cm; Milli-Q). Porciones debidamente pesadas y proporcionadas al filtro total, se colocaron en bombas de Teflón Savilex de 70 mL y

se le añadió 10 ml de HNO_3 : HCl concentrado (10 ml 3:1 v/v) y 2 mL de HF concentrado. Posterior a una pre digestión mayor a 4 h y desgasificación, las bombas fueron selladas herméticamente y colocadas en una plancha de calentamiento Mod Block para su digestión a 120°C durante 12 h en (Figura 3).



Figura 3. Proceso de digestión ácida de muestras de filtros.

7.5. Lectura y análisis de datos

Las concentraciones de Cd en las muestras digeridas se midieron en un espectrómetro de masas de alta resolución acoplado inductivamente a un generador de plasma (HR-ICP-MS de sector magnético Finnigan MAT Element XR® (Figura 4) (Soto-Jiménez *et al.*, 2011).



Figura 4. HR-ICP-MS de sector magnético Finnigan MAT Element XR®

7.6. Análisis de la variabilidad espacial y temporal de cadmio en el aire y su relación con la fuente de emisión

Se estudiaron 2 factores de influencia sobre la variabilidad de las concentraciones de Cd: 1) Distancia y dirección con respecto al complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles y 2) Meses del año. En este estudio se integraron las bases de datos y se realizaron los análisis estadísticos básicos para la descripción de los resultados mediante el programa Excel (Microsoft Inc.). Se georeferenciaron los niveles de Cd mediante el programa informático Google Earth y se construyeron mapas de isolíneas de concentración mediante Sistemas de Información Geográfica. Para tal propósito se utilizó el programa Surfer 21 (Goldensoftware Inc.) y se estableció la distribución espacial de Cd por el método de interpolación Kringing. También se evaluó la relación entre el nivel de concentración en función de la distancia al complejo metalúrgico hacia diferentes direcciones. Finalmente, se realizó un análisis estadístico básico, incluyendo la relación de Cd con la distancia del complejo mediante el programa JMP 14.3 (SAS Institute Inc.).

7.7. Comparación de los resultados de las concentraciones de cadmio con las normas y guías de cadmio en el aire a nivel nacional e internacional.

Para analizar el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales se construyeron gráficos de la variabilidad temporal de cadmio en el aire, indicando los límites de seguridad y máximos permisibles. Se establece que $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es la cantidad límite de cadmio en el aire del lugar de trabajo establecida por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) (ATSDR, 1999). De igual manera en México se cuenta con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por cadmio, donde la concentración total de referencia en suelos industriales es de $450 \text{ mg}/\text{kg}$ (SEMARNAT, 2007).

7.8. Evaluación de riesgos de exposición de metales pesados en TSP

Los residentes que viven en un área urbana impactada por la emisión de metales, como es el caso de la zona urbana de Torreón, son receptores potenciales de metales presentes en el aire. En este estudio se evaluó el riesgo de exposición en cuatro grupos de población: 1) infantes de 0 a 1 año, 2) niños de 2 a 5 años, 3) niños de 6 a 12 años, y 4) adultos de 19 años en adelante. Esto debido a que estos grupos de población presentan diferencias en sus sistemas respiratorios y niveles aceptables de metales en el aire.

Se calcularon el índice de contaminación ambiental y el riesgo potencial, mediante la metodología propuesta por (Li *et al.*, 2015). La contaminación del aire tiene efectos en la salud humana tanto agudos, como crónicos. Una forma de evaluar los efectos es a través del índice de contaminación del aire, que se utiliza para conocer el riesgo a la salud generado por la contaminación del aire

7.8.1. Factor de contaminación (CF, por sus siglas en inglés)

El Factor de contaminación describe el nivel de contaminación del polvo de la calle que contienen un metal pesado. Este factor se calcula mediante la relación entre la concentración de cada metal pesado (C_n) y su valor de fondo (C_{bn}).

$$CF = \frac{cn}{cbn}$$

Con base en los resultados obtenidos para CF, el nivel de contaminación por metales pesados fue establecido de la siguiente manera: $CF < 1$, bajo; $1 \leq CF \leq 3$, moderado; $3 \geq CF < 6$, considerable; y $CF \geq 6$, muy alto (Delgado-Iniesta *et al.*, 2022).

En general, la exposición a los EPTs del aire puede ocurrir a través de tres vías principales: (a) inhalación directa de partículas atmosféricas a través de la boca y la nariz; (b) absorción dérmica de oligoelementos en partículas adheridas a la piel expuesta; y (c) por la ingestión de partículas atmosféricas posterior a su depósito. En este estudio se estimaron los riesgos del cadmio en la atmósfera vía inhalación, ingestión y contacto dérmico de acuerdo con el Manual de Evaluación de Riesgos a la Salud Humana (Parte A), el de Orientación Complementaria para la Evaluación de Riesgos Dérmicos (Parte E) y el de Orientación Complementaria para la Evaluación del Riesgo de Inhalación (Parte F) (US EPA, 2011a). Para tal propósito se estimó la ingesta diaria del metal (ID_{Cd}), la dosis absorbida por la piel (DAP_{Cd}), y la concentración de exposición (EC_{Cd}). Las ecuaciones usadas fueron las siguientes:

$$InhD_{metal} = \frac{[C_{metal}] \times [ingR]}{BW} \times \frac{[EF] \times [ED]}{AT} \times FC \quad \text{Ecuación 1}$$

$$IngD_{metal} = \frac{[C_{metal}] \times [ingR]}{BW} \times \frac{[EF] \times [ED]}{AT} \times FC \quad \text{Ecuación 2}$$

$$DAP_{metal} = \frac{[C_{metal}] \times [SA] \times [AF]}{BW} \times \frac{[EF] \times [ED]}{AT} \times FC \quad \text{Ecuación 3}$$

$$EC_{metal} = \frac{[C_{metal}] \times [EF] \times [TE]}{BW} \quad \text{Ecuación 4}$$

En la Tabla 1 se presentan los valores recomendados para la realización de la evaluación del factor de contaminación y el riesgo potencial a la salud.

Tabla 1. Valores recomendados de la dosis de exposición diaria de TSP.

Parámetros	Definición	Valor por categorías de edad			
		Infantil (0-1 año)	Niños (2-5 años)	Niños (6-12 años)	Adultos 19-75 años)
C _{metal}	Concentración media de PM _{2.5} en el aire del ambiente (µg/m ³)				
FC	Factor de conversión (10 ⁻⁶ kg mg ⁻¹)				
IngR	Tasa de ingestión (mg/día)	60	60	60	30
EF	Frecuencia de exposición (días/año)	350	350	350	350
ED	Duración de la exposición (años)	1	6	12	30
ET	Tiempo de exposición (h)	1	8	6	3
AT	Tiempo promedio (días); AT = EDX365 días 365	365	2190	4380	10950
BW	Peso corporal (kg)	11.3	22.6	45.3	71.8
SA	Superficie de la piel (cm ²)	2800	2800	2800	5700
AF	Factor de adherencia suelo a piel (mg/cm ² /evento)	0.2	0.2	0.2	0.07
ABS	Fracción de absorción dérmica	0.001	0.001	0.001	0.001
InhR	Tasa de inhalación (m ³ /día)	9.2	16.74	21.02	21.4

Fuente: (US EPA 1987).

Los valores de la dosis de referencia (RfD) utilizados para estimar el HQ se presentan en Tabla 2.

Tabla 2. Valores de referencia recomendados ($\text{mg kg}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)

	Cadmio
RfDing	1.00E-03
RfDderm	1.00E-05
RfDinh	1.00E-03
SF	6.30E+00

Fuente: (US EPA, 1992).

RfDing, RfDderm y RfDinh = tasa diaria aceptable vía ingesta, dermal y por inhalación, respectivamente. SF= factor de seguridad.

La dosis de referencia (RfD), es el riesgo máximo permisible estimado para los seres humanos debido a la exposición diaria a un contaminante conocido. RfCi, es la concentración de inhalación de referencia; $\text{HQ} < 1$ significa que no se producirá ningún riesgo adverso para la salud; $\text{HQ} > 1$ significa que se producirán efectos no cancerosos potenciales. En la Tabla 3 se presentan los límites máximos permisibles de cadmio en el aire en cada estación del año.

Tabla 3. Límites máximos permisibles de Cd ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el aire

Metal	Invierno	Verano
As	0.035	0.07
Cd	0.026	0.022
Cr	0.354	0.309
Cu	0.2	0.2
Fe	4.3	3.4
Ni	0.067	0.061
Pb	0.5	0.5

NAAQS: National Ambient Air Quality Standards; USEPA: United States Environmental Protection Agency; NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health (2017).

7.8.2. Estimación de Riesgos Carcinogénicos de metales pesados en TSP.

El Riesgo de Cáncer (CR, por sus siglas en inglés) se define como la probabilidad de que las personas desarrollen cáncer, debido a la exposición a contaminantes cancerígenos a lo largo de su vida. Los riesgos cancerígenos fueron calculados usando la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo de cáncer (CR)} = \text{LADDinh} \times \text{SF}$$

Donde LADDinh= dosis diaria mediana en el tiempo de vida y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{LADDinh} = \frac{[C_{\text{metal}}] \times [EF] \times [TE]}{[AT] \times [PEF]} \times \left(\frac{[TasaIng-niño] \times [TE]_{niño}}{[BW]_{niño}} + \frac{[TasaIng-ad] \times [TE]_{ad}}{[BW]_{ad}} \right) \quad \text{ecuación 5}$$

Para carcinógenos, la dosis se multiplica por SF (factor de pendiente correspondiente) para conocer una estimación del riesgo de cáncer. El SF de cadmio se muestra en la Tabla 2. Se considera un riesgo muy alto cuando los rangos de CR son de 10^{-6} y 10^{-4} .

7.9. Análisis Estadístico de Datos

Se usó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov para conocer si son normales los resultados de la concentración de cadmio en el ambiente urbano de Torreón, Coahuila. Al no ser normales, se determinó por medio de la prueba de correlación de Spearman, la asociación de las concentraciones de cadmio en el ambiente con la distancia a la fundidora. Se consideró un nivel de significancia de <0.05 en todas las pruebas.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Variabilidad temporal

La Tabla 4 presenta un resumen estadístico de las concentraciones mensuales de cadmio en el aire en la zona urbana de Torreón. Las concentraciones de cadmio en el aire fueron más bajas en los meses de mayo, junio y septiembre, con valores que variaron desde 0.034 a 0.037 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones máximas se encontraron en diciembre y febrero, con valores de 0.054 y 0.056 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Tabla 4. Niveles de concentración de Cd en material atmosférico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) recolectado en la zona urbana de Torreón, Coahuila, en los años 2014-2018.

Meses	Promedio	Desviación estándar
Enero	0.043	0.003
Febrero	0.056	0.003
Marzo	0.042	0.003
Abril	0.038	0.003
Mayo	0.034	0.003
Junio	0.037	0.003
Julio	0.038	0.003
Agosto	0.041	0.003
Septiembre	0.037	0.003
Octubre	0.041	0.003
Noviembre	0.044	0.003
Diciembre	0.054	0.003

Los resultados de este trabajo concuerdan con los obtenidos por Elżbieta-Radzka (2020), quien demostró en Siedlce, Polonia, que el contenido de metales pesados a lo largo del año estaba influenciado por el mes del año. La concentración más baja de As se registró de mayo a agosto, y de cadmio de enero a marzo, así como de

octubre a diciembre. Al igual que el cadmio, el contenido de plomo fue mayor en los meses de invierno (de octubre a marzo).

En Torreón, la temporada de lluvias se presenta en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre (H. Ayuntamiento de Torreón, 2021). La lluvia arrastra a los metales suspendidos en el aire y provoca que sean dispersos hacia el alcantarillado u otras zonas (Luo *et al.*, 2019), por ello en el presente estudio, la concentración de los metales en la atmósfera descendió en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

En cambio, entre diciembre y febrero de cada año se tienen las temperaturas más bajas y ocurren inversiones térmicas (IT), y tolvaneras eventuales. La IT es un fenómeno atmosférico muy común que ocurre con frecuencia en grandes áreas donde los vientos son muy débiles y la componente vertical del viento es descendente, de forma tal que la temperatura aumenta con la altura en lugar de disminuir como es lo normal. Cuando esto ocurre, las partículas de aire se mueven muy poco y quedan atrapadas en una capa desde la superficie del terreno hasta una altura de cientos de metros o menos (Peña *et al.*, 2020). En Torreón, la temporada de IT coincide con los meses más secos del año (H. Ayuntamiento de Torreón, 2021), la combinación de ambos sucesos ocasiona un desequilibrio térmico en el cual la contaminación queda atrapada sin posibilidad de dispersarse en la atmósfera (Peña *et al.*, 2020). Esta situación coincide con las mayores concentraciones de cadmio observadas en la atmósfera de Torreón en diciembre y febrero. Ya que, si el aire de la ciudad no está limpio se genera una elevación sustancial de los índices PM, y por tanto una mayor presencia de contaminantes en el aire (Traboulsi *et al.*, 2017; Polo-Bravo & Sulca-Quispe, 2018).

Respecto a otras ciudades, el rango de la concentración de cadmio observado en la ciudad de Torreón se encuentra muy por debajo de $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que corresponde a la concentración obtenida por Noriega *et al.* (2008) en el aire de Zambiza, Ecuador, cuya presencia se podría deber a que el punto de muestreo fue cercano al basurero donde se encuentran desechos de tipo electrónico, y en donde también se

encuentran presentes pigmentos para plásticos, que al ser incinerados se disipan en el ambiente.

De acuerdo con ATSDR (1999), se pueden registrar niveles de cadmio superiores a $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en áreas urbanas con elevada contaminación en el aire, proveniente de la quema de combustibles fósiles. Por lo tanto, las concentraciones encontradas de este metal en los meses de diciembre y febrero en el aire de Torreón entrarían en la categoría de las áreas urbanas con niveles elevados de contaminación en el aire.

Las concentraciones de cadmio en el aire presentadas en todo el año en el aire de Torreón se encuentran muy por debajo de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que es la cantidad límite de cadmio en el aire del lugar de trabajo establecida por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) (ATSDR, 1999). También se encuentran por debajo de $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual puede producir neumonitis química y, en los casos graves, edema pulmonar (Stellman 2001).

En México se cuenta con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por cadmio, donde la concentración total de referencia en suelos industriales es de $450 \text{ mg}/\text{kg}$ (SEMARNAT, 2007).

8.2. Variabilidad por sitio y distancia al complejo

En la Tabla 5 se observa qué en los 14 sitios de muestreo, durante todos los meses del año. La colonia cAlam que se ubica a 8 km de distancia de la planta y Lejos W ubicada a 2.7 km, presentaron los niveles más bajos de cadmio (0.014 y $0.018 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente). En cambio, la colonia EC que se ubica a 1.9 km del complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles, y Frey a 3 km, mostraron las mayores concentraciones de cadmio. En EC las concentraciones de cadmio fueron $0.057 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que, en Frey los niveles de los mismos metales fueron $0.078 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 5. Niveles de concentración de Cd en material atmosférico ($\mu\text{g m}^{-3}$) recolectado en la zona urbana de Torreón, Coahuila, en los años 2014-2018.

Colonia	promedio	Desviación estándar
Primer cuadro (1C)	0.053	0.00344
Fertirrey (Frey)	0.078	0.00342
Tecnológico (Tec)	0.061	0.00339
L. Echeverría (LE)	0.069	0.00335
Emilio Carranza (EC)	0.057	0.00334
Bomberos (Bomb)	0.022	0.00332
Justo sierra (JS)	0.038	0.00336
Vicente guerrero (VG)	0.029	0.00361
LEA bosque centenario (LE-N)	0.055	0.00392
Eduardo Guerra (EG)	0.033	0.00338
Torreón jardín (cTJ)	0.023	0.00343
Lázaro Cárdenas (LC)	0.046	0.00337
Cuadro lejos (Lejos W)	0.018	0.00344
C. Alameda (cAlam)	0.014	0.00332

Estos resultados concuerdan con Puga *et al.* (2006), quienes encontraron en San Francisco del Oro, Chihuahua, que la concentración de plomo, cadmio, zinc y arsénico disminuyó conforme la distancia de los jales ahí presentes. De igual manera, con los resultados presentados por Benin *et al.* (1999). En este estudio se reportó que las concentraciones de arsénico, cadmio y plomo provenientes de colonias ubicadas dentro de los 2 m de distancia de refineries en Chihuahua, Monterrey y Torreón, disminuían con el aumento de la distancia de la fuente de contaminación.

Asimismo, Méndez-Gómez *et al.* (2008) observaron en la Región Lagunera, México, que la concentración de plomo era mayor en sangre de niños de escuelas que

habitaban en las cercanías de una planta fundidora. Mientras que García-Vargas *et al.* (2001) observaron en Torreón, que los niveles de plomo en sangre aumentaban en los niños que asistían a las escuelas más cercanas al complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles. Por último, García-Vargas *et al.* (2014) encontraron que la presencia de plomo en sangre de niños y de arsénico, cadmio y plomo en suelo y polvo aumentaba conforme a la cercanía de esta fundidora.

8.3. Variabilidad sobre la dirección

En las Tablas 6 a 17, se presenta el resumen descriptivo de los análisis de la concentración de cadmio en material atmosférico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) alrededor de Met-Mex Peñoles. Los datos fueron ordenados por colonias en cada mes del año. Las concentraciones presentaron un amplio rango de variación, con un valor mínimo de $0.0041 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al oeste y un máximo de $0.1324 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al este de Met-Mex Peñoles. En general, las concentraciones más bajas se encontraron en las estaciones localizadas hacia el oeste de la industria, mientras que las máximas hacia el este. Las muestras recolectadas en las zonas aledañas a la industria Met-Mex Peñoles ($<1\text{km}$), presentaron promedios desde 0.0736 a $0.1324 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Se conoce que los fenómenos naturales contribuyen a las altas o bajas concentraciones de contaminantes atmosféricos. En este caso, la dirección del viento tiene una gran influencia en las concentraciones de contaminantes. Los niveles de concentración de contaminantes ambientales más altos se encuentran cuando la velocidad del viento es baja. Sin embargo, con velocidades del viento más altas, el polvo es arrastrado por el viento, lo que contribuye a aumentar los niveles de partículas en el ambiente (Elminir, 2005).

Tabla 6. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de enero en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio ± D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met- mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.0196±0.01064	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0280±0.01085	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0163±0.01085	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0403±0.01109	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0473±0.01085	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0368±0.01085	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.1007±0.01064	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0379±0.01085	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.04±0.01085	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0724±0.01085	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0590±0.0129	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0066±0.01064	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.0529±0.01064	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0421±0.01189	1.18	SSE

Tabla 7. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de febrero en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio ± D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met-mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.013±0.01134	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0335±0.01134	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0160±0.01109	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0329±0.01109	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0596±0.01109	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.054±0.01109	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.0984±0.0116	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0437±0.01134	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.1089±0.0116	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.1003±0.01109	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0680±0.01253	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0044±0.01134	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.0982±0.01134	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0492±0.01134	1.18	SSE

Tabla 8. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de marzo en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio $\pm$ D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met- mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.021 $\pm$ 0.01043	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0173 $\pm$ 0.01023	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0135 $\pm$ 0.01043	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0133 $\pm$ 0.01109	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0435 $\pm$ 0.01043	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0469 $\pm$ 0.01064	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.0894 $\pm$ 0.01043	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0362 $\pm$ 0.01109	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0707 $\pm$ 0.01023	2.7	SE
L. Marzo,Echeverría (LE)	0.0563 $\pm$ 0.01023	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0505 $\pm$ 0.01134	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0069 $\pm$ 0.01043	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.095 $\pm$ 0.01023	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.021 $\pm$ 0.01043	1.18	SSE

Tabla 9. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de abril en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio $\pm$ D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met- mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.0185 $\pm$ 0.01064	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0182 $\pm$ 0.01064	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0169 $\pm$ 0.01109	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0208 $\pm$ 0.01064	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0424 $\pm$ 0.01064	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0469 $\pm$ 0.01064	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.0704 $\pm$ 0.01064	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0310 $\pm$ 0.01085	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0518 $\pm$ 0.01064	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0587 $\pm$ 0.01064	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0444 $\pm$ 0.0122	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0062 $\pm$ 0.01064	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.0830 $\pm$ 0.01085	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0238 $\pm$ 0.01085	1.18	SSE

Tabla 10. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de mayo en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio $\pm$ D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met- mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.01240.01134	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0204 $\pm$ 0.01109	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0135 $\pm$ 0.01109	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0173 $\pm$ 0.01109	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0423 $\pm$ 0.01134	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0229 $\pm$ 0.01109	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.0698 $\pm$ 0.01109	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0295 $\pm$ 0.01109	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0432 $\pm$ 0.01109	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0736 $\pm$ 0.01109	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.047 $\pm$ 0.01253	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0042 $\pm$ 0.01134	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.053 $\pm$ 0.01109	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0259 $\pm$ 0.01109	1.18	SSE

Tabla 11. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de junio en los años 2014-2018.

Tabla 11.

Sitio	Promedio ± D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met- mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.0405±0.0129	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0215±0.01253	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0116±0.0122	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0203±0.0122	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0689±0.0122	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0296±0.0122	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.055±0.01329	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0458±0.01253	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0205±0.0122	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0738±0.01253	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0684±0.01475	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0135±0.0129	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.0303±0.0122	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0218±0.0122	1.18	SSE

Tabla 12. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de julio en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio $\pm$ D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met-mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.0914 $\pm$ 0.0122	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0143 $\pm$ 0.01189	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0113 $\pm$ 0.01189	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0188 $\pm$ 0.01189	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0863 $\pm$ 0.01189	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0142 $\pm$ 0.01189	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.0596 $\pm$ 0.01373	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0455 $\pm$ 0.01189	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0165 $\pm$ 0.0129	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0688 $\pm$ 0.01189	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0429 $\pm$ 0.01373	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0305 $\pm$ 0.0122	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.019 $\pm$ 0.01189	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0197 $\pm$ 0.01373	1.18	SSE

Tabla 13. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de agosto en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio ± D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met- mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.0847±0.0129	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0157±0.01134	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0132±0.01189	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0228±0.01189	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0735±0.01189	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0219±0.0122	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.0432±0.01134	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0409±0.01134	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0237±0.0116	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0795±0.01253	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0549±0.01475	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0282±0.0129	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.0576±0.01134	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0198±0.01329	1.18	SSE

Tabla 14. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de septiembre en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio ± D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met- mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.1078±0.01253	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0177±0.01189	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0098±0.0116	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0135±0.01329	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0537±0.0122	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0215±0.0129	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.0416±0.01189	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0310±0.0116	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0215±0.0116	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0623±0.0116	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0538±0.01373	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0359±0.01253	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.0349±0.01253	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0154±0.01329	1.18	SSE

Tabla 15. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de octubre en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio ± D.E. (µg m⁻³)	Distancia desde Met- mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.0749±0.0129	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0176±0.01109	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0154±0.01109	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0128±0.0116	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0567±0.01134	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0219±0.01189	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.0916±0.01189	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0309±0.0116	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0314±0.0122	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0548±0.0116	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0547±0.01421	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0249±0.0129	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.0626±0.01253	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0266±0.01329	1.18	SSE

Tabla 16. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de noviembre en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio ± D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met-mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.0602±0.01253	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0262±0.01253	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.0133±0.01253	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0347±0.01253	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0609±0.01253	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0325±0.01253	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.0828±0.0129	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0393±0.0129	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0439±0.01253	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0608±0.01253	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0497±0.01475	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0202±0.01253	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.0629±0.01373	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0294±0.01329	1.18	SSE

Tabla 17. Nivel de la concentración de Cd en material atmosférico en función de la dirección y distancia en el mes de diciembre en los años 2014-2018.

Sitio	Promedio ± D.E. ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Distancia desde Met- mex (Km)	Dirección
Primer cuadro (1C)	0.0830±0.0122	0.11	NNW
Bomberos (Bomb)	0.0293±0.0122	1.1	ENE
C. Alameda (cAlam)	0.01727±0.0122	7.88	E
Torreón jardín (cTJ)	0.0172±0.01373	1.87	E
Emilio Carranza (EC)	0.0467±0.0122	1.05	W
Eduardo Guerra (EG)	0.0450±0.0122	1.38	ESE
Fertirrey (Frey)	0.1324±0.0122	0.5	E
Justo sierra (JS)	0.0375±0.0122	1.1	WSW
Lázaro Cárdenas (LC)	0.0733±0.0122	2.7	SE
L. Echeverría (LE)	0.0704±0.0122	0.93	N
LEA bosque centenario (LE-N)	0.0594±0.01475	1.22	W
Cuadro lejos (Lejos W)	0.0278±0.0122	2.7	W
Tecnológico (Tec)	0.0778±0.0122	0.69	NE
Vicente guerrero (VG)	0.0394±0.01421	1.18	SSE

La Figura 5 refleja que el cadmio se concentró principalmente hacia el este (E) y oeste (O) de la industria, sin embargo, los mayores niveles se encontraron hacia el este (E) con concentraciones $>0.12 \mu\text{g/m}^3$ y las menores hacia el este-noreste (ENE) donde las concentraciones no sobrepasan los $0.04 \mu\text{g/m}^3$.

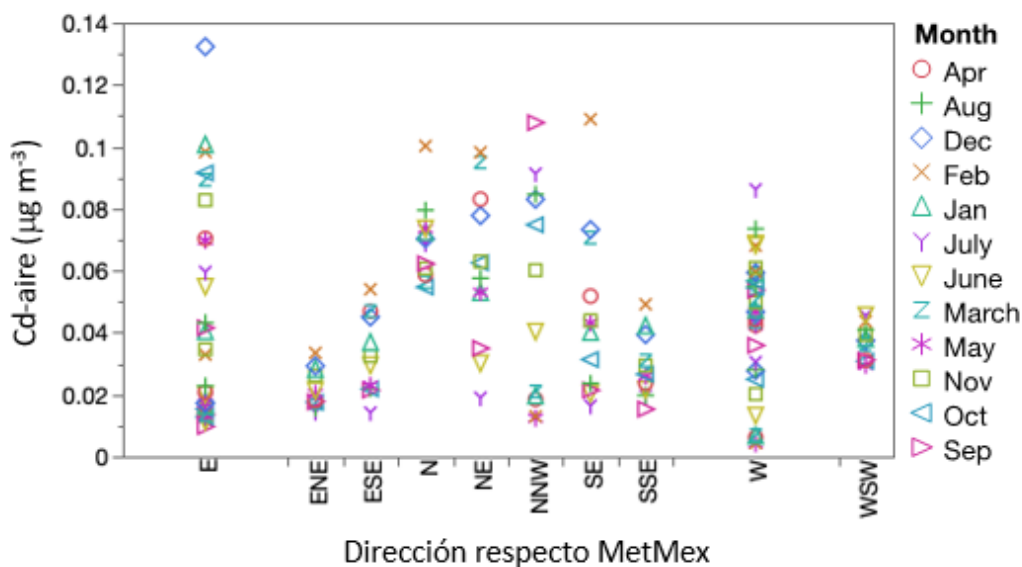


Figura 5. Concentración de Cd en material atmosférico ($\mu\text{g m}^{-3}$) vs la dirección

Estos resultados podrían deberse a las corrientes del viento. En el mismo estudio realizado por Benin *et al.* (1999) en Chihuahua, Monterrey y Torreón, se reveló que la contaminación del aire se veía afectada predominantemente por la temperatura y humedad del aire y la velocidad del viento. A medida que aumentaba la temperatura del ambiente, disminuían los contenidos de arsénico, cadmio, plomo, y PM_{10} . Además, se encontró que el aumento en la velocidad del viento contribuía a la disminución significativa de la concentración de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. Además, la velocidad del viento afectó el contenido de metales pesados. La humedad relativa del aire influyó en la concentración de metales de noviembre a mayo, mientras que un aumento en la velocidad del viento contribuyó a una disminución significativa en la concentración de PM_{10} solamente en el período de enero a noviembre (Elżbieta-Radzka, 2020).

Los niveles de Cd en la atmosfera varían desde 5 ng/m^3 en áreas rurales, 0.005 a $0.015 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ en áreas urbanas, y hasta $0.06 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ en áreas industriales (U.S. EPA, 1992a,b). Las concentraciones de Cd pueden alcanzar $0.3 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ como medias semanales en áreas cercanas a fundidoras (U.S. EPA, 1987). La Organización Mundial de la Salud recomienda que los niveles de Cd en el aire no deben exceder

0.001-0.005 y 0.01-0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in áreas rurales y urbanas, respectivamente. Comparativamente, las concentraciones de Cd en el área urbana de Torreón son de 3 a 10 veces mayores a los niveles en áreas rurales y cotidianamente mayores a los niveles en áreas urbanas, pero menores o comparables a los de áreas industriales. Con respecto a áreas urbanas cercanas a fundidoras, en Torreón los niveles de Cd son significativamente más bajos.

8.4. Evaluación del Riesgo Ambiental y de Salud Causado por TSP

En la Tabla 18 se presenta el riesgo ambiental provocado por cadmio en el aire de la zona de Torreón, Coahuila. La evaluación se efectuó durante los 12 meses del año, considerando la época climática en intervalos de 1 a 7 km respecto a la industria. Se muestran dos niveles de concentración distintos, donde se considera el valor más bajo encontrado en la zona y el límite máximo permisible propuesto por la EPA. Los niveles más altos se obtuvieron en los meses de diciembre y febrero en la época otoñal, la cual es una temporada fría con IT, con vientos muy débiles y con la componente vertical del viento en forma descendente, de forma tal que la temperatura aumenta con la altura en lugar de disminuir como es lo normal. Cuando esto ocurre, las partículas de aire se mueven muy poco y quedan atrapadas en una capa desde la superficie del terreno hasta una altura de cientos de metros o menos (Peña *et al.*, 2020).

Tabla 18. Factor de contaminación atmosférico en los años 2014-2018 de acuerdo a niveles naturales y límites propuestos y establecidos por la US EPA.

Estación climática	Mes	Sitio	Dirección	CFatm Background	CFatmEPA limit
Invierno	Enero	1C	NNW<0.5 km	2.8	70
		Bomb	ENE1km	4.3	107.5
		cAlam	E>7km	2.7	67.5
		cTJ	E1-2km	4.4	110
		EC	W1km	8.1	202.5
		EG	ESE1-2km	5.8	145
		Frey	E<1km	15.0	375
		JS	WSW1km	6.0	150
		LC	SE2-3km	4.5	112.5
		LE	N1km	11.6	290
		LE-N	W1-2km	9.6	240
		Tec	NE<1km	8.0	200
		VG	SSE1-2km	6.3	157.5
		1C	NNW<0.5 km	2.6	65
Invierno	Febrero	Bomb	ENE1km	5.1	127.5
		cAlam	E>7km	2.8	70
		cTJ	E1-2km	3.0	75

primavera	Marzo	EC	W1km	11.8	295
		EG	ESE1-2km	6.6	165
		Frey	E<1km	17.8	445
		JS	WSW1km	5.4	135
		LC	SE2-3km	9.0	225
		LE	N1km	16.4	410
		LE-N	W1-2km	10.1	252.5
		Tec	NE<1km	9.4	235
		VG	SSE1-2km	5.6	140
		1C	NNW<0.5 km	2.6	65
		Bomb	ENE1km	3.0	75
		cAlam	E>7km	2.0	50
		cTJ	E1-2km	3.0	75
		EC	W1km	6.7	167.5
		EG	ESE1-2km	9.0	225
		Frey	E<1km	15.7	392.5
		JS	WSW1km	5.8	145
		LC	SE2-3km	8.0	200
		LE	N1km	7.6	190
		LE-N	W1-2km	8.6	215
		Tec	NE<1km	14.2	355

primavera	Abril	VG	SSE1-2km	5.4	135
		1C	NNW<0.5 km	3.0	75
		Bomb	ENE1km	3.0	75
		cAlam	E>7km	3.0	75
		cTJ	E1-2km	3.8	95
		EC	W1km	6.4	160
		EG	ESE1-2km	5.6	140
		Frey	E<1km	8.2	205
		JS	WSW1km	5.6	140
		LC	SE2-3km	5.4	135
		LE	N1km	8.6	215
		LE-N	W1-2km	7.8	195
		Tec	NE<1km	6.2	155
		VG	SSE1-2km	3.8	95
Verano	Mayo	1C	NNW<0.5 km	2.6	65
		Bomb	ENE1km	4.2	105
		cAlam	E>7km	2.8	70
		cTJ	E1-2km	2.8	70
		EC	W1km	5.9	147.5
		EG	ESE1-2km	3.2	80
		Frey	E<1km	7.2	180

Verano	Junio	JS	WSW1km	5.4	135
		LC	SE2-3km	3.0	75
		LE	N1km	11.2	280
		LE-N	W1-2km	7.4	185
		Tec	NE<1km	6.0	150
		VG	SSE1-2km	4.8	120
		1C	NNW<0.5 km	2.8	70
		Bomb	ENE1km	3.0	75
		cAlam	E>7km	2.8	70
		cTJ	E1-2km	3.0	75
		EC	W1km	10.4	260
		EG	ESE1-2km	3.0	75
		Frey	E<1km	5.9	147.5
		JS	WSW1km	10.5	262.5
Verano	Julio	LC	SE2-3km	3.0	75
		LE	N1km	8.1	202.5
		LE-N	W1-2km	8.2	205
		Tec	NE<1km	4.0	100
		VG	SSE1-2km	3.6	90
		1C	NNW<0.5 km	3.0	75
		Bomb	ENE1km	3.0	75

Verano	Agosto	cAlam	E>7km	2.4	60
		cTJ	E1-2km	3.1	77.5
		EC	W1km	16.3	407.5
		EG	ESE1-2km	3.0	75
		Frey	E<1km	3.4	85
		JS	WSW1km	8.6	215
		LC	SE2-3km	2.8	70
		LE	N1km	12.4	310
		LE-N	W1-2km	7.4	185
		Tec	NE<1km	2.8	70
		VG	SSE1-2km	3.2	80
		1C	NNW<0.5 km	3.0	75
		Bomb	ENE1km	2.9	72.5
		cAlam	E>7km	2.8	70
		cTJ	E1-2km	3.0	75
		EC	W1km	12.0	300
		EG	ESE1-2km	3.0	75
		Frey	E<1km	7.1	177.5
		JS	WSW1km	8.4	210
		LC	SE2-3km	2.6	65
		LE	N1km	13.2	330

Verano	Septiembre	LE-N	W1-2km	9.2	230
		Tec	NE<1km	3.0	75
		VG	SSE1-2km	3.1	77.5
		1C	NNW<0.5 km	3.0	75
		Bomb	ENE1km	3.0	75
		cAlam	E>7km	1.0	25
		cTJ	E1-2km	2.0	50
		EC	W1km	10.4	260
		EG	ESE1-2km	1.8	45
		Frey	E<1km	7.0	175
		JS	WSW1km	6.8	170
		LC	SE2-3km	3.0	75
		LE	N1km	9.8	245
		LE-N	W1-2km	9.6	240
		Tec	NE<1km	4.8	120
		VG	SSE1-2km	3.0	75
Otoño	Octubre	1C	NNW<0.5 km	2.6	65
		Bomb	ENE1km	3.0	75
		cAlam	E>7km	2.0	50
		cTJ	E1-2km	2.8	70
		EC	W1km	9.3	232.5

Otoño	Noviembre	EG	ESE1-2km	2.8	70
		Frey	E<1km	13.2	330
		JS	WSW1km	6.0	150
		LC	SE2-3km	2.8	70
		LE	N1km	7.2	180
		LE-N	W1-2km	10.7	267.5
		Tec	NE<1km	5.2	130
		VG	SSE1-2km	4.2	105
		1C	NNW<0.5 km	3.0	75
		Bomb	ENE1km	5.4	135
		cAlam	E>7km	2.6	65
		cTJ	E1-2km	5.0	125
		EC	W1km	11.5	287.5
		EG	ESE1-2km	5.0	125
		Frey	E<1km	13.8	345
		JS	WSW1km	6.6	165
		LC	SE2-3km	4.3	107.5
		LE	N1km	9.1	227.5
		LE-N	W1-2km	8.2	205
		Tec	NE<1km	5.8	145
		VG	SSE1-2km	5.2	130

Invierno	Diciembre	1C	NNW<0.5 km	3.0	75
		Bomb	ENE1km	4.8	120
		cAlam	E>7km	2.8	70
		cTJ	E1-2km	2.0	50
		EC	W1km	5.8	145
		EG	ESE1-2km	7.2	180
		Frey	E<1km	19.2	480
		JS	WSW1km	6.8	170
		LC	SE2-3km	8.0	200
		LE	N1km	9.2	230
		LE-N	W1-2km	7.4	185
		Tec	NE<1km	10.2	255
		VG	SSE1-2km	7.3	182.5

CF=factor de contaminación; CF_{atm background}= Contenido de cadmio atmosférico respecto al valor mínimo de referencia encontrado en la zona de evaluación, límite 0.005 µg m⁻³; CF_{atmEPA limit}= contenido de C atmosférico en relación al valor natural de 0.0002 µg/m³.

8.5. Evaluación de Riesgos para la Salud (HHRA)

8.5.1. Riesgo potencial en infantes de 0 a 1 año de edad

En la Tabla 19 se presenta el resumen descriptivo de los análisis de riesgo (HQ) para cadmio por su inhalación, ingestión y contacto dermal en infantes que viven alrededor de Met-Mex Peñoles. Los datos fueron ordenados por dirección del viento y distancia. Las concentraciones presentaron un amplio rango de variación. De acuerdo con la EPA, se excedieron límites de ingesta establecidos ($1.00\text{E-}03$ mg de Cd/Kg p.c. día). La mayor concentración fue hacia el norte, a 1 km de distancia de la industria con un valor de $1.58\text{E-}03$. El contacto dermal también excedió el límite establecido por la EPA ($1.00\text{E-}05$ mg de Cd/kg p.c. día), siendo hacia el norte el valor más alto que se registró ($1.48\text{E-}05$). Estos resultados evidencian que las principales rutas de ingreso corporal del cadmio en bebés de 0 a 1 año, son la inhalación y el contacto dermal.

Basados en el HI para cadmio, existe un riesgo y es mayor en las estaciones localizadas hasta 1 km en las direcciones norte y oeste con valores de 3.23 y 3.10, respectivamente, excediendo el límite máximo permisible de 1. La dirección que presentó el menor riesgo se localizó hacia el este, a >7 km con un HI de 0.82 y de 1 a 2 km con un HI de 0.90.

Tabla 19. Evaluación de riesgos para Cd en la salud de infantes de 0 a 1 año de edad respecto a la distancia de Met-Mex Peñoles en los años 2014-2018

Sitio	Inhalación	Ingesta	Contacto dermal	HQ inhalación	HQ ingesta	HQ dermal	HI
E1-2km	1.23E-05	4.40E-04	4.11E-06	0.459292	0.012857	0.428673	0.90
E<1km	4.34E-05	1.03E-03	9.58E-06	1.069912	0.045288	0.998584	2.11
E>7km	9.66E-06	4.04E-04	3.77E-06	0.42146	0.010075	0.393363	0.82
ENE1km	1.45E-05	5.30E-04	4.95E-06	0.552876	0.015164	0.516018	1.08
ESE1-2km	1.82E-05	6.15E-04	5.74E-06	0.641814	0.018997	0.599027	1.26
N1km	4.05E-05	1.58E-03	1.48E-05	1.648894	0.042201	1.538968	3.23
NE<1km	2.59E-05	8.93E-04	8.33E-06	0.930973	0.027003	0.868909	1.83
NNW<0.5 km	1.11E-05	4.64E-04	4.33E-06	0.483628	0.011534	0.451386	0.95
SE2-3km	1.83E-05	6.50E-04	6.07E-06	0.678097	0.019133	0.632891	1.33
SSE1-2km	1.81E-05	5.50E-04	5.14E-06	0.573894	0.018827	0.535634	1.13
W1-2km	3.39E-05	1.17E-03	1.1E-05	1.225	0.035349	1.143333	2.40
W1km	3.73E-05	1.52E-03	1.42E-05	1.582522	0.038877	1.477021	3.10
WSW1km	2.66E-05	1.09E-03	1.02E-05	1.138496	0.027784	1.062596	2.23

HQ =cociente de riesgo; HI infantil=suma de los cocientes de peligrosidad (HQ) que representa la magnitud de los impactos nocivos de las vías de exposición totales.

En la Tabla 20 se observa el análisis de riesgo para cadmio atmosférico por inhalación, ingestión y contacto dermal en bebés de 0 a 1 año que habitan alrededor de Met-Mex Peñoles. Se tomó como referencia 60 mg/día de ingesta diaria de cadmio. Los máximos HI se observaron en los meses de julio y agosto (tiempo de lluvias) y en los meses de febrero y diciembre (temporada fría) donde ocurre el fenómeno de IT. Cuando se presenta la IT la contaminación queda atrapada sin posibilidad de dispersarse en la atmósfera, aumentando la concentración de cadmio atmosférico. En estas condiciones, las principales rutas de ingreso de cadmio al organismo son la inhalación y el contacto dermal.

En general, los niños son más susceptibles a los efectos de los contaminantes del aire que los adultos; sin embargo, la susceptibilidad individual también tiene un papel importante. La exposición a los contaminantes en los primeros años de vida genera la disminución del crecimiento pulmonar y da como resultado una función pulmonar reducida. Dentro de las enfermedades respiratorias debidas a cuestiones ambientales se incluyen: infecciones virales y bacterianas agudas de las vías respiratorias inferiores; otitis media; asma y enfermedades respiratorias crónicas (Gavidia et al., 2009).

Tabla 20. Evaluación de riesgos para Cd en la salud de infantes de 0 a 1 año de edad respecto a la época en los años 2014-2018.

Estación	mes	Inhalación	Ingesta	Contacto dermal	HQ inhalación	HQ ingesta	HQ dermal	HI
Invierno	Enero	2.74E-05	9.10E-04	8.49E-06	0.94912	0.02861	0.88584	1.86
Invierno	Febrero	3.02E-05	8.94E-04	8.34E-06	0.93262	0.03152	0.87044	1.83
Primavera	Marzo	2.92E-05	8.46E-04	7.89E-06	0.88180	0.03047	0.82301	1.74
Primavera	Abril	2.13E-05	6.82E-04	6.37E-06	0.71150	0.02221	0.66407	1.40
Verano	Mayo	1.09E-05	4.79E-04	4.47E-06	0.49912	0.01140	0.46584	0.98
Verano	Junio	2.11E-05	7.75E-04	7.23E-06	0.80784	0.02195	0.75398	1.58
Verano	Julio	2.29E-05	9.62E-04	8.98E-06	1.00316	0.02387	0.93628	1.96
Verano	Agosto	2.19E-05	1.06E-03	9.90E-06	1.10651	0.02283	1.03274	2.16
Verano	Septiembre	1.94E-05	8.85E-04	8.26E-06	0.92276	0.02018	0.86124	1.80
Otoño	Octubre	1.09E-05	4.48E-04	4.18E-06	0.46726	0.01140	0.43611	0.91
Otoño	Noviembre	2.44E-05	7.22E-04	6.74E-06	0.75341	0.02544	0.70319	1.48
Invierno	Diciembre	2.69E-05	8.78E-04	8.19E-06	0.91517	0.02806	0.85416	1.80

HQ =cociente de riesgo HI infantil=suma de los cocientes de peligrosidad (HQ) que representa la magnitud de los impactos nocivos de las vías de exposición totales.

8.5.2. Riesgo potencial en niños de 2 a 5 años de edad

En la Tabla 21 se observa el análisis de riesgo para cadmio atmosférico por inhalación, ingestión y contacto dermal en niños de 2 a 5 años que habitan alrededor de Met-Mex Peñoles. Los valores presentaron un amplio rango de variación. Con base a los límites máximos permisibles establecidos por la EPA que se presentan en la Tabla 2, el ingreso de cadmio al organismo a través de la ingesta, inhalación y contacto dermal no excedió el límite individual, sin embargo, el conjunto de las tres rutas de exposición HI presentó un riesgo alto para los niños. Cuando en el sitio se presenta un valor >1 , significa que el riesgo a la salud y el riesgo cancerígeno es alto. Valores >1 se presentaron a <1 km al E y NE, a 1 km al N, W y WSW, de 1 a 2 km al W, y de 2 a 3 km al SE de la industria metalúrgica.

Tabla 21. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de niños de 2 a 5 años de edad respecto a la distancia de Met-Mex Peñoles en los años 2014-2018

Sitio	Inhalación	Ingesta	Contacto dermal	HQ inhalación	HQ ingesta	HQ dermal	HI
E1-2km	1.12E-05	2.20E-04	2.06E-06	0.023394	0.459292	0.214336	0.70
E<1km	3.95E-05	5.13E-04	4.79E-06	0.082404	1.069912	0.499292	1.65
E>7km	8.79E-06	2.02E-04	1.89E-06	0.018333	0.42146	0.196681	0.64
ENE1km	1.32E-05	2.65E-04	2.47E-06	0.027591	0.552876	0.258009	0.84
ESE1-2km	1.66E-05	3.08E-04	2.87E-06	0.034566	0.641814	0.299513	0.98
N1km	3.68E-05	7.91E-04	7.38E-06	0.076787	1.648894	0.769484	2.50
NE<1km	2.36E-05	4.46E-04	4.17E-06	0.049134	0.930973	0.434454	1.41
NNW<0.5 km	1.01E-05	2.32E-04	2.16E-06	0.020987	0.483628	0.225693	0.73
SE2-3km	1.67E-05	3.25E-04	3.03E-06	0.034813	0.678097	0.316445	1.03
SSE1-2km	1.64E-05	2.75E-04	2.57E-06	0.034258	0.573894	0.267817	0.88
W1-2km	3.08E-05	5.87E-04	5.48E-06	0.064318	1.225	0.571667	1.86
W1km	3.39E-05	7.59E-04	7.08E-06	0.070738	1.582522	0.73851	2.39
WSW1km	2.42E-05	5.46E-04	5.09E-06	0.050553	1.138496	0.531298	1.72

HQ =cociente de riesgo HI infantil=suma de los cocientes de peligrosidad (HQ) que representa la magnitud de los impactos nocivos de las vías de exposición totales.

En la Tabla 22 se presenta el análisis riesgo para cadmio atmosférico por inhalación, ingestión y contacto dermal en niños de 2 a 5 años de acuerdo a la estación del año. Los datos fueron ordenados por mes y estación del año tomando como referencia una ingesta diaria de 100 mg/día propuesta por la EPA. Los valores de HI para niños de 2 a 5 años durante los 12 meses del año fueron altos e inclusive, excedieron los límites permisibles establecidos por la EPA.

La exposición de la población a la contaminación del aire es ubicua e involuntaria. Puede ocasionar desde efectos fisiológicos imperceptibles, hasta enfermedades e inclusive la muerte. Los niños son un grupo especialmente vulnerable por la inmadurez de los sistemas respiratorio e inmune, y también por las conductas propias de la edad. Los efectos respiratorios a corto plazo que más sean reportado en niños son: el aumento de síntomas y consultas de urgencia por causas respiratorias, el aumento de exacerbaciones asmáticas y la reducción en la función pulmonar. Mientras que el efecto a largo plazo en los niños más expuestos es el déficit en el crecimiento de la función pulmonar (Ubilla & Yohannessen, 2017)

Tabla 22. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de niños de 2 a 5 años de edad respecto a la estación del año en los años 2014-2018

Estación	mes	Inhalación	Ingesta	Contacto dermal	HQ inhalación	HQ ingesta	HQ dermal	HI
Invierno	Enero	2.496E-05	4.55E-04	4.25E-06	0.94912	0.05206	0.4429	1.44
Invierno	Febrero	2.750E-05	4.47E-04	4.17E-06	0.93262	0.05735	0.4352	1.43
Primavera	Marzo	2.658E-05	4.23E-04	3.95E-06	0.88180	0.05545	0.4115	1.35
Primavera	Abril	1.938E-05	3.41E-04	3.183E-06	0.71150	0.04042	0.3320	1.08
Verano	Mayo	9.944E-06	2.39E-04	2.23E-06	0.49912	0.02074	0.2329	0.75
Verano	Junio	1.915E-05	3.87E-04	3.61E-06	0.80784	0.03995	0.3770	1.22
Verano	Julio	2.083E-05	4.81E-04	4.49E-06	1.00316	0.04344	0.4681	1.51
Verano	Agosto	1.991E-05	5.31E-04	4.95E-06	1.10651	0.04153	0.5164	1.66
Verano	Septiembre	1.760E-05	4.42E-04	4.13E-06	0.92276	0.03672	0.4306	1.39
Otoño	Octubre	9.944E-06	2.24E-04	2.09E-06	0.46726	0.02074	0.2181	0.71
Otoño	Noviembre	2.220E-05	3.61E-04	3.37E-06	0.75341	0.04629	0.3516	1.15
Invierno	Diciembre	2.448E-05	4.39E-04	4.10E-06	0.91517	0.05106	0.4271	1.39

HQ =cociente de riesgo; HI infantil=suma de los cocientes de peligrosidad (HQ), que representa la magnitud de los impactos nocivos de las vías de exposición totales.

8.5.3. Riesgo potencial en niños de 6 a 12 años de edad

La Tabla 23 presenta el análisis de riesgo para cadmio atmosférico por inhalación, ingestión y contacto dermal en niños de 6 a 12 años ordenado por dirección del viento y distancia. Las concentraciones presentaron un amplio rango de variación. Basados en el HQ, el ingreso corporal del cadmio con mayor riesgo en esta edad es por inhalación. La exposición varió entre los diferentes miembros de la población expuesta, los valores de HQ también varió entre los miembros de esa población expuesta. Basados en el HI para cadmio el mayor riesgo se ubicó a 1 km en dirección N y W, con valores de 2.13 y 3.04, respectivamente, excediendo el límite máximo permisible (1). La dirección que presentó el menor riesgo se localizó de 1 a 2 km hacia el este.

Tabla 23. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de niños de 6 a 12 años de edad respecto a la distancia de Met-Mex Peñoles en los años 2014-2018

Sitio	Inhalación	Ingesta	Contacto	HQ	HQ	HQ	HI
			dermal	inhalación	ingesta	dermal	
E1-2km	7.03E-06	1.10E-04	1.03E-06	0.029375	0.459292	0.106932	0.60
E<1km	2.48E-05	2.56E-04	2.39E-06	0.103472	1.069912	0.249095	1.42
E>7km	5.51E-06	1.01E-04	9.41E-07	0.02302	0.42146	0.098124	0.54
ENE1km	8.29E-06	1.32E-04	1.23E-06	0.034646	0.552876	0.12872	0.72
ESE1-2km	1.04E-05	1.54E-04	1.43E-06	0.043404	0.641814	0.149426	0.83
N1km	2.31E-05	3.94E-04	3.68E-06	0.096419	1.648894	0.383893	2.13
NE<1km	1.48E-05	2.23E-04	2.08E-06	0.061696	0.930973	0.216748	1.21
NNW<0.5 km	6.30E-06	1.16E-04	1.08E-06	0.026353	0.483628	0.112597	0.62
SE2-3km	1.05E-05	1.62E-04	1.51E-06	0.043714	0.678097	0.157873	0.88
SSE1-2km	1.03E-05	1.37E-04	1.28E-06	0.043017	0.573894	0.133613	0.75
W1-2km	1.93E-05	2.93E-04	2.73E-06	0.080763	1.225	0.285202	1.59
W1km	2.12E-05	3.79E-04	3.53E-06	0.088823	1.582522	0.36844	2.04
WSW1km	1.52E-05	2.72E-04	2.54E-06	0.063479	1.138496	0.265063	1.47

HQ =cociente de riesgo; HI infantil=suma de los cocientes de peligrosidad (HQ), que representa la magnitud de los impactos nocivos de las vías de exposición totales.

La Tabla 24 muestra el análisis de riesgo para cadmio atmosférico por inhalación, ingestión y contacto dermal en niños de 6 a 12 años. Los datos fueron ordenados por mes y estación del año tomando como referencia una ingesta diaria máxima de 150 mg día establecida por la EPA.

Basados en el HI, se excedió los límites permisibles en 8 meses del año. El valor más alto de HI se encontró en el mes de agosto con un valor de 1.42, y el más bajo fue registrado en el mes de octubre con un valor de 0.60. En estas condiciones, las principales rutas de ingreso de cadmio al organismo fueron la inhalación y el contacto dermal.

Tabla 24. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de niños de 6 a 12 años de edad respecto a la estación del año en los años 2014-2018

Estación	mes	Inhalación	Ingesta	Contacto dermal	HQ inhalación	HQ ingesta	HQ dermal	HI
Invierno	Enero	1.56E-05	2.27E-04	2.12E-06	0.9491	0.0654	0.2210	1.24
Invierno	Febrero	1.72E-05	2.23E-04	2.08E-06	0.9326	0.0720	0.2171	1.22
Primavera	Marzo	1.67E-05	2.11E-04	1.97E-06	0.8818	0.0696	0.2053	1.16
Primavera	Abril	1.21E-05	1.70E-04	1.59E-06	0.7115	0.0508	0.1657	0.93
Verano	Mayo	6.23E-06	1.19E-04	1.11E-06	0.4991	0.0260	0.1162	0.64
Verano	Junio	1.20E-05	1.93E-04	1.80E-06	0.8078	0.0502	0.1881	1.05
Verano	Julio	1.30E-05	2.40E-04	2.24E-06	1.0032	0.0545	0.2336	1.29
Verano	Agosto	1.25E-05	2.65E-04	2.47E-06	1.1065	0.0522	0.2576	1.42
Verano	Septiembre	1.10E-05	2.21E-04	2.06E-06	0.9228	0.0461	0.2148	1.18
Otoño	Octubre	6.23E-06	1.12E-04	1.04E-06	0.4673	0.0260	0.1088	0.60
Otoño	Noviembre	1.39E-05	1.80E-04	1.68E-06	0.7534	0.0581	0.1754	0.99
Invierno	Diciembre	1.53E-05	2.19E-04	2.04E-06	0.9152	0.0641	0.2131	1.19

HQ=cociente de riesgo; HI infantil=suma de los cocientes de peligrosidad (HQ), que representa la magnitud de los impactos nocivos de las vías de exposición totales.

8.5.4. Riesgo potencial en adultos de 19 a 75 años de edad

La Tabla 25 presenta el análisis de riesgo para cadmio atmosférico por inhalación, ingestión y contacto dermal en adultos de 19 a 75 años. Los datos fueron ordenados por dirección del viento y distancia. El HQ que más influyó en el organismo de los adultos fueron la ingesta e inhalación, que sin exceder el máximo permisible presentaron un riesgo considerable. Basándose en el HI, se excedió el límite permitido a una distancia de 1 km hacia el N y W.

Los niños corren mayor riesgo que los adultos ante los muchos efectos nocivos para la salud que tiene la contaminación atmosférica, es por ello que los resultados mostrados entre niños y adultos marcan una gran diferencia. Los niños son especialmente vulnerables durante el desarrollo fetal y en sus primeros años de vida, cuando los pulmones, los órganos y el cerebro están todavía en desarrollo. Respiran más rápidamente que los adultos, aspirando más aire y, por tanto, más contaminantes. Los niños viven más próximos al suelo, donde algunos contaminantes alcanzan concentraciones máximas. Suelen pasar mucho tiempo fuera de casa, jugando y practicando actividad física en ambientes potencialmente contaminados (Organización Mundial de la Salud, 2018).

Tabla 25. Evaluación de riesgo para Cd en la salud de adultos de 19 a 75 años que habita en los alrededores de Met-Mex Peñoles respecto al sitio de exposición en los años 2014-2018

Sitio	Inhalación	Ingesta	Contacto dermal	HQ	HQ	HQ	HI
				inhalación	ingesta	dermal	
E1-2km	4.51E-06	3.47E-05	4.61E-07	0.029906	0.229646	0.048069	0.31
E<1km	1.59E-05	8.07E-05	1.07E-06	0.105343	0.534956	0.111976	0.75
E>7km	3.54E-06	3.18E-05	4.23E-07	0.023436	0.21073	0.04411	0.28
ENE1km	5.32E-06	4.17E-05	5.55E-07	0.035272	0.276438	0.057863	0.37
ESE1-2km	6.67E-06	4.84E-05	6.44E-07	0.044189	0.320907	0.067171	0.43
N1km	1.48E-05	1.24E-04	1.65E-06	0.098162	0.824447	0.172571	1.10
NE<1km	9.48E-06	7.02E-05	9.34E-07	0.062811	0.465487	0.097435	0.63
NNW<0.5 km	4.05E-06	3.65E-05	4.85E-07	0.026829	0.241814	0.050616	0.32
SE2-3km	6.72E-06	5.12E-05	6.81E-07	0.044504	0.339049	0.070969	0.45
SSE1-2km	6.61E-06	4.33E-05	5.76E-07	0.043794	0.286947	0.060063	0.39
W1-2km	1.24E-05	9.24E-05	1.23E-06	0.082223	0.6125	0.128207	0.82
W1km	1.36E-05	1.19E-04	1.59E-06	0.090429	0.791261	0.165625	1.05
WSW1km	9.75E-06	8.59E-05	1.14E-06	0.064626	0.569248	0.119154	0.75

En la Tabla 26 se observa el análisis de riesgo del cadmio atmosférico por inhalación, ingestión y contacto dermal en adultos de 19 a 75 años que habitan alrededor de Met-Mex Peñoles. Los datos fueron ordenados por mes y estación del año. Se observa que la principal vía de ingreso de cadmio al organismo de los adultos fue la inhalación, posteriormente el contacto dermal y finalmente la ingestión. Sin embargo, ningún mes rebasó el valor límite de HI para cadmio (1). El HI más alto se presentó en julio, con un valor de 0.72 y el más bajo se obtuvo en agosto, con 0.66.

Tabla 26. Evaluación de riesgos para Cd en la salud de adultos de 19 a 75 años de edad respecto a la estación del año en los años 2014-2018

Estación	mes	Inhalación	Ingesta	Contacto dermal	HQ inhalación	HQ ingesta	HQ dermal	HI
Invierno	Enero	1.00E-05	7.16E-05	9.53E-07	0.4746	0.06655	0.0993	0.64
Invierno	Febrero	1.11E-05	7.04E-05	9.36E-07	0.4663	0.07332	0.0976	0.64
Primavera	Marzo	1.07E-05	6.65E-05	8.85E-07	0.4409	0.07088	0.0923	0.60
Primavera	Abril	7.80E-06	5.37E-05	7.14E-07	0.3558	0.05167	0.0745	0.48
Verano	Mayo	7.31E-06	5.62E-05	7.47E-07	0.3721	0.04844	0.0779	0.50
Verano	Junio	7.71E-06	6.10E-05	8.11E-07	0.4039	0.05107	0.0845	0.54
Verano	Julio	8.38E-06	7.57E-05	1.01E-06	0.5016	0.05553	0.1050	0.66
Verano	Agosto	8.01E-06	8.35E-05	1.11E-06	0.5533	0.05309	0.1158	0.72
Verano	Septiembre	7.08E-06	6.96E-05	9.26E-07	0.4614	0.04694	0.0966	0.60
Otoño	Octubre	4.00E-06	3.53E-05	4.69E-07	0.2336	0.02651	0.0489	0.31
Otoño	Noviembre	8.93E-06	5.69E-05	7.56E-07	0.3767	0.05918	0.0789	0.51
Invierno	Diciembre	9.85E-06	6.91E-05	9.18E-07	0.4576	0.06527	0.0958	0.62

HQ=cociente de riesgo; HI infantil=suma de los cocientes de peligrosidad (HQ), que representa la magnitud de los impactos nocivos de las vías de exposición totales.

8.5.5. Riesgo cancerígeno

Los resultados de este estudio mostraron que la ingestión de cadmio representó el mayor riesgo de efecto cancerígeno y, por lo tanto, el riesgo de salud más significativo para niños y adultos. En segundo lugar, se encontró el contacto dérmico, seguido de la inhalación.

La Tabla 27 muestra los valores de HI y el riesgo de cáncer evaluado en cuatro diferentes rangos de edad: 1) infantes de 0 a 1 año, 2) niños de 2 a 5 años, 3) niños de 6 a 12 años), y 4) adultos de 19 años en adelante. Los datos fueron ordenados por sitio y dirección tomando como referencia una ingesta diaria máxima establecida por la EPA de 60 mg/día como valor mínimo, y de 200 mg/día como valor máximo. El HI fue alto en más de una estación de muestro en todos los diferentes rangos de edad, mostrando una mayor concentración al este y oeste a 1 km de la industria. Los altos valores de riesgo en este estudio sugieren la importancia que se le debe prestar a la salud de los niños que viven en las inmediaciones de la planta de fundición. Ya que como se mencionó anteriormente, los efectos de los metales en la salud de los niños son más graves en comparación con los adultos (Yang & Massey- yaw 2019).

Las autoridades deben tomar decisiones de gestión de riesgos en aquellos casos en los que el índice de riesgo de cáncer se encuentre entre $1.00E-06$ y $1.00E-04$.

Tabla 27. Riesgo de cáncer en la población expuesta (desde su nacimiento hasta la edad adulta) que habita en los alrededores de Met-Mex Peñoles en Torreón, Coahuila.

	60 mg	200 mg								
Sitio	HI Infantil (0-1 año)	HI Infantil	HI Niños (2-5 años)	HI Niños	HI Niños (6-12 años)	HI Niños	HI Adultos (19-75 años)	HI Adultos	LAAD VIDA	Riesgo de cáncer
E1-2km	0.90	0.90	0.70	1.77	0.60	1.28	0.31	0.84	5.95E-07	3.75E-06
E<1km	2.11	2.11	1.65	4.15	1.42	3.03	0.75	2.00	1.39E-06	8.73E-06
E>7km	0.82	0.82	0.64	1.62	0.54	1.17	0.28	0.77	5.46E-07	3.44E-06
ENE1km	1.08	1.08	0.84	2.13	0.72	1.55	0.37	1.01	7.16E-07	4.51E-06
ESE1-2km	1.26	1.26	0.98	2.47	0.83	1.80	0.43	1.18	8.31E-07	5.24E-06
N1km	3.23	3.23	2.50	6.34	2.13	4.60	1.10	3.02	2.14E-06	1.35E-05
NE<1km	1.83	1.83	1.41	3.59	1.21	2.61	0.63	1.71	1.21E-06	7.60E-06
NNW<0.5 km	0.95	0.95	0.73	1.86	0.62	1.35	0.32	0.88	6.27E-07	3.95E-06
SE2-3km	1.33	1.33	1.03	2.61	0.88	1.90	0.45	1.25	8.78E-07	5.53E-06
SSE1-2km	1.13	1.13	0.88	2.22	0.75	1.61	0.39	1.06	7.43E-07	4.68E-06
W1-2km	2.40	2.40	1.86	4.72	1.59	3.43	0.82	2.25	1.59E-06	1.00E-05
W1km	3.10	3.10	2.39	6.08	2.04	4.41	1.05	2.89	2.05E-06	1.29E-05
WSW1km	2.23	2.23	1.72	4.38	1.47	3.17	0.75	2.08	1.47E-06	9.29E-06

IX. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que las concentraciones de cadmio atmosférico disminuyen conforme las estaciones de colecta se alejan del complejo Met-Mex Peñoles. Por tal razón, las colonias más afectadas fueron Fertirrey que se ubica a 7.1 km y Emilio Carranza que se localiza a 1.05 km, en dirección este y oeste de Met-Mex Peñoles, respectivamente.

Mediante este estudio se encontró que en la temporada fría y al mismo tiempo más seca, se tiene un aumento de la concentración de cadmio en el PM de la zona urbana de Torreón.

Considerando estos resultados, se tiene que las concentraciones bajas o altas de cadmio no solo dependen de la concentración en función de la distancia de la planta Peñoles hacia las estaciones de muestreo, sino que también existe un efecto de la situación climatológica de Torreón.

En la evaluación de riesgos para la salud, la inhalación fue la principal vía de exposición al cadmio atmosférico para niños y adultos, seguido de la ingestas y exposición por contacto dermal. Asimismo, el valor del índice de salud para los niños fue mayor que el de los adultos, lo que confirma que el cadmio en el aire representa un grave riesgo potencial para la salud de los niños.

Los valores del riesgo cancerígeno obtenidos en nuestro estudio se encuentran por encima del límite de 10^{-6} establecido por OSHA, por lo que existe un alto riesgo de cáncer en toda la población situada en Torreón, Coahuila. El modelo utilizado para evaluar la probabilidad de efectos de los productos químicos peligrosos en los seres humanos demostró ser una herramienta útil para evaluar los riesgos en la salud humana por el contacto con cadmio y para identificar las vías de exposición de mayor preocupación.

Las concentraciones de cadmio encontradas en todo el año en el aire de Torreón se encuentran muy por debajo de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que es la cantidad límite de cadmio en el aire del lugar de trabajo establecida por la OSHA. Comparativamente, las concentraciones de Cd en el área urbana de Torreón son de 3 a 10 veces mayores a los niveles en áreas rurales y cotidianamente mayores a los niveles en áreas urbanas, pero menores o comparables a los de áreas industriales

Las evidencias que se presentaron anteriormente demuestran que, aunque existan otros factores que influyan en las concentraciones de cadmio en el PM, podría ser un problema permanecer por tiempo indefinido en zonas urbanas cercanas al complejo metalúrgico.

X. RECOMENDACIONES

Es importante exponer la gravedad del problema de la población que habita en la zona urbana de Torreón, Coahuila.

Se propone plantear proyectos de investigación que aporten mayor conocimiento respecto al daño ambiental y de salud que causa la contaminación expulsada por las Industrias Peñoles.

Se sugiere que el Ayuntamiento de Torreón, Coahuila, apoye proyectos de investigación y presente programas de comunicación de riesgos generados por el complejo metalúrgico Met-Mex Peñoles.

Solicitar a Met-Mex Peñoles que incremente la eficiencia en la reducción de emisiones y que su programa de limpieza se expanda a un radio mayor a 2 km.

Reubicar a la población de áreas de mayor riesgo de contaminación y/o aportar diagnósticos y medicamentos a los individuos ya expuestos.

Aumentar el nivel de conciencia pública, especialmente de los grupos sensibles, sobre la incidencia del cáncer y sus factores importantes y reducir la exposición a contaminantes tóxicos del aire.

XI. REFERENCIAS

- Armoa, J., Mendez, F., & Rolon, T. (2016). Estudio de la variabilidad de la concentración de material particulado en una zona de actividad minera de la ciudad de itá en febrero del año 2015. *Reportes Científicos de la Facen*, 7(2), 47-50.
- ATSDR (1999). Resumen de salud pública de cadmio. Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de salud pública agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades.
- Benin, A. L., Sargent, J. D., Dalton, M., & Roda, S. (1999). High concentrations of heavy metals in neighborhoods near ore smelters in northern Mexico. *Environmental Health Perspectives*, 107(4), 279-284.
- Blondet, I., Schreck, E., Viers, J., Casas, S., Jubany, I., Bahí, N., Zouiten, C., Dufréchou, G., Freydier, R., Galy-Lacaux, C., Martínez-Martínez, S., Faz. A., Soriano-Disla, M., Acosta, J. A., & Darrozes, J. (2019). Atmospheric dust characterisation in the mining district of Cartagena-La Unión, Spain: air quality and health risks assessment. *Science of the Total Environment*, 693, 133496.
- Branca, J. J. V., Morucci, G., & Pacini, A. (2018). Cadmium-induced neurotoxicity: still much ado. *Neural Regeneration Research*, 13(11), 1879.
- Censo de Población y Vivienda. (2020) - Cuestionario Básico. Disponible en línea en: <https://datamexico.org/es/profile/geo/torreon> (consultado el 11 de noviembre de 2021).
- Cerón-Bretón, J., Bretón, R. C., Guzmán, A. E., Severino, R. L., Fuentes, M. E., Lozada, S. C., Lara R, C., Guarnaccia, C., & Nolasco, V. B. (2022). Morphological and chemical characterization of atmospheric particles PM₁₀ in an urban site in Leon, Guanajuato, Mexico. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2162, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.
- Cevallos, V. M., Diaz, V., & Sirois, C. M. (2017). Particulate matter air pollution from the city of Quito, Ecuador, activates inflammatory signaling pathways in vitro. *Innate Immunity*, 23(4), 392-400.
- Corona-Sánchez, J. E., González-Chávez, M. D. C. A., Carrillo-González, R., Scheckel, K., Tapia-Maruri, D., & García-Cue, J. L. (2021). Metal (loid)

- bioaccessibility of atmospheric particulate matter from mine tailings at Zimapan, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15), 19458-19472.
- Cheng, K., Tian, H. Z., Zhao, D., Lu, L., Wang, Y., Chen, J., X. G. Liu, W. X. Jia & Huang, Z. (2014). Atmospheric emission inventory of cadmium from anthropogenic sources. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(3), 605-616.
- del Real, Á., Santurtún, A., & Zarrabeitia, M. T. (2021). Epigenetic related changes on air quality. *Environmental Research*, 197, 111155.
- Delgado-Iniesta, M. J., Marín-Sanleandro, P., Díaz-Pereira, E., Bautista, F., Romero-Muñoz, M., & Sánchez-Navarro, A. (2022). Estimation of Ecological and Human Health Risks Posed by Heavy Metals in Street Dust of Madrid City (Spain). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5263.
- Elminir, H. K. (2005). Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of the Total Environment*, 350(1-3), 225-237.
- Elżbieta-Radzka (2020). The effect of meteorological conditions on air pollution in Siedlce. *Journal of Ecological Engineering*, 21(1), 97-104.
- Fiordelisi, A., Piscitelli, P., Trimarco, B., Coscioni, E., Iaccarino, G., & Sorriento, D. (2017). The mechanisms of air pollution and particulate matter in cardiovascular diseases. *Heart Failure Reviews*, 22(3), 337-347.
- Flores-Ramírez, R., Rico-Escobar, E., Núñez-Monreal, J. E., García-Nieto, E., Carrizales, L., Ilizaliturri-Hernández, C., & Díaz-Barriga, F. (2012). Exposición infantil al plomo en sitios contaminados. *Salud Pública de México*, 54, 383-392.
- García-Vargas, G. G., Andrade, M. R., Rosales-González, M. G., Goytia-Acevedo, R., García-Arenas, G., & Candelas-Rangel, J. L. (2007). Contaminación por metales en suelos de la ciudad de Torreón, Coahuila, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Aridas*, 6, 165-168.
- García-Vargas, G. G., Rothenberg, S. J., Silbergeld, E. K., Weaver, V., Zamoiski, R., Resnick, C., Rubio-Andrade, N., Parsons, P. J., Steuerwald, A. J., Navas-

- Acien, A., & Guallar, E. (2014). Spatial clustering of toxic trace elements in adolescents around the Torreón, Mexico lead–zinc Smelter. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 24(6), 634-642.
- García-Vargas., Andrade, M. R., Razo, L. D., Aburto, V. B., Aguilar, E. V., & Cebrian, M. E. (2001). Lead exposure in children living in a smelter community in region Lagunera, Mexico. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, 62(6), 417-429.
- Gavidia, T., Pronczuk, J., & Sly, P. D. (2009). Impactos ambientales sobre la salud respiratoria de los niños: Carga global de las enfermedades respiratorias pediátricas ligada al ambiente. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 25(2), 99-108.
- Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2021). The effects of cadmium toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3782.
- Ghizal, F., Ammar M, R., Najah, H., Nitu, N., & Abbas, A, M., (2019). Cadmium in human diseases: it's more than just a mere metal. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 34(4), 371-378.
- H. Ayuntamiento de Torreón (2021). Disponible en línea en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM05coahuila/municipios/05035a.html> (consultado el 11 de noviembre del 2021).
- Hayat, M. T., Nauman, M., Nazir, N., Ali, S., & Bangash, N. (2019). Environmental hazards of cadmium: past, present, and future. In *Cadmium toxicity and tolerance in plants* (pp. 163-183). Academic Press.
- Hernández-Escamilla, J. A., Flores-Margez, J. P., & Shukla, M. K. (2015). Particulate matter: capture and quantification in natural and anthropogenic sources. *J Environ Anal Toxicol*, 5(281), 2161-0525.
- Hooda, P. S. (2010). Basic principles, processes, sampling and analytical aspects. *Trace Elements in Soils*, 13, 461-480.
- Jin, S. P., Li, Z., Choi, E. K., Lee, S., Kim, Y. K., Seo, E. Y., Chung, J. H., & Cho, S. (2018). Urban particulate matter in air pollution penetrates into the barrier-

- disrupted skin and produces ROS-dependent cutaneous inflammatory response in vivo. *Journal of Dermatological Science*, 91(2), 175-183.
- Kumar, M., Gogoi, A., Kumari, D., Borah, R., Das, P., Mazumder, P., & Tyagi, V. K. (2017). Review of perspective, problems, challenges, and future scenario of metal contamination in the urban environment. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 21(4), 04017007.
- Li, L., Lin, G. Z., Liu, H. Z., Guo, Y., Ou, C. Q., & Chen, P. Y. (2015). Can the air pollution index be used to communicate the health risks of air pollution? *Environmental Pollution*, 205, 153-160.
- Luo, X., Bing, H., Luo, Z., Wang, Y., & Jin, L. (2019). Impacts of atmospheric particulate matter pollution on environmental biogeochemistry of trace metals in soil-plant system: A review. *Environmental Pollution*, 255, 113138.
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14.
- Martínez, M. J. (2012). La contaminación ambiental y ocupacional por plomo y sus efectos en la salud reproductiva masculina, evidencia de daño al ADN. *Revista Iberoamericana de las Ciencias de la Salud*, 1, 1-36
- Méndez-Gómez, J., García-Vargas, G. G., López-Carrillo, L., Calderón-Aranda, E. S., Gómez, A., Vera, E., Valverde, M., Cebrián, E., & Rojas, E. (2008). Genotoxic effects of environmental exposure to arsenic and lead on children in region Lagunera, Mexico. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1140(1), 358-367.
- Meza-Figueroa, D., De la O-Villanueva, M., & De la Parra, M. L. (2007). Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo, Sonora, México. *Atmospheric Environment*, 41(2), 276-288.
- Mishra, S., Bharagava, RN, More, N., Yadav, A., Zainith, S., Mani, S. & Chowdhary, P. (2019). Contaminación por metales pesados: una amenaza alarmante para el medio ambiente y la salud humana. En *Biotecnología ambiental: por un futuro sostenible* (págs. 103-125). Springer, Singapur.

- Moran Molina, G. G., & Gonzaga Añazco, S. J. (2017). Análisis de la medición del impacto ambiental como producto del crecimiento económico. *Universidad y Sociedad* [seriada en línea], 9 (1), pp. 87-90. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/>
- Noriega, R. P., Medici, A., Murillo, A., Bedón, J., Haro, F., & Galecio, G. (2008). Estudio de la concentración de cadmio y plomo en el aire de la ciudad de Quito, empleando briofitas como biomonitores. *La Granja*, 8(2), 17-24.
- Organización Mundial de la Salud (2018). Contaminación atmosférica y salud infantil: prescribir aire limpio. Resumen. Ginebra: Organización Mundial de la Salud;(WHO/CED/PHE/18.01). Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Peña, A. R. M., López, V. M. C., Concepción, F. O. G., Sánchez, H. U. R., Gutiérrez, J. A., & Guadalupe, M. E. G. (2008). Estudio de las inversiones térmicas en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) y su relación con la calidad del aire. Propuesta de diagnóstico y predicción utilizando el modelo WRF (Weather Research Forecasting). *Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, (30).
- Pérez-García, E. P., & Azcona-Cruz, M. I. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(3), 199-205.
- Polo-Bravo & Sulca-Quispe (2018). Metales pesados: fuentes y su toxicidad sobre la salud humana. *Ciencias*, 2(1), 20-36.
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C. & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. *Ecología Aplicada*, 5, 149-155
- Pujari, M., & Kapoor, D. (2021). Heavy metals in the ecosystem: Sources and their effects. In *Heavy Metals in the Environment* (pp. 1-7). Elsevier.
- Qi, C., Zhou, W., Lu, X., Luo, H., Pham, B. T., & Yaseen, Z. M. (2020). Particulate matter concentration from open-cut coal mines: A hybrid machine learning estimation. *Environmental Pollution*, 263, 114517.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jimenez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y

- seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77.
- Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *Medisan*, 21(12), 3372-3385.
- Rychlik, K. A., Secrest, J. R., Lau, C., Pulczynski, J., Zamora, M. L., Leal, J., Langley, R., Myatt, L. G., Raju, M., Chang, R. C., Li, Y., Golding, M. C., Rodrigues-Hoffmann, A., Molina, M. J., Zhang, R., & Johnson, N. M. (2019). In utero ultrafine particulate matter exposure causes offspring pulmonary immunosuppression. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(9), 3443-3448.
- Sampler, H. V. H. (1999). Sampling of ambient air for total suspended particulate matter (SPM) and PM10 using high volume (HV) Sampler.
- SEMARNAT (2007). Norma Oficial Mexicana NOM147-SEMARNAT/SSA1-2004. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 2 de marzo de 2007
- Soto-Jiménez, M. F. y Flegal, A. R. (2011a). Childhood lead poisoning from the smelter in Torreón, México. *Environmental Research*, 111, 590–596.
- Soto-Jiménez, M. F. y Flegal, A. R. (2011b). Metal-contaminated indoor and outdoor housedust from a neighborhood Smelter area in Torreón, Mexico. *Procedia Environmental Sciences*, 4, 134-137.
- Soto-Jiménez, M. F., & Flegal, A. R. (2021). Inventory of Pb emissions from one of the largest historic Pb smelter worldwide: 118-year legacy of Pb pollution in northern Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(16), 20737-20750.
- Stellman J. M. (2001). Metales: propiedades químicas y toxicidad. Nordberg G. (Ed.). *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo* (63.2- 63.51). Gestión Editorial Chantal Dufresne, BA.
- Traboulsi, H., Guerrina, N., Iu, M., Maysinger, D., Ariya, P., & Bagloli, C. J. (2017). Inhaled pollutants: the molecular scene behind respiratory and systemic diseases associated with ultrafine particulate matter. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(2), 243.

- Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111-118.
- U.S. EPA (1987) Exposure Factors Handbook. National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development.
- U.S. EPA. (1992a) Guidelines for exposure assessment. Washington, DC: Office of Research and Development, Office of Health and Environmental Assessment. EPA/600/Z-92/001.
- U.S. EPA. (1992b) Dermal exposure assessment: principles and applications. Washington, DC: Office of Health and Environmental Assessments. EPA/600/8-9/011F.
- US EPA. (1997). Exposure Factors Handbook. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency; United States Environmental Protection Agency.
- US EPA. (2011a). Human Health Risk Assessment. United States Environmental Protection Agency. Recuperado de: <https://www.epa.gov/risk/human-health-risk-assessment>. Acceso el (12/05/2022).
- Vázquez-Ruíz (2017). México: minería neoextractiva y secuelas regionales en el territorio. *Economía Coyuntural, Revista de Temas de Perspectivas y Coyuntura*, 2 (2), 181-213.
- Yang, F., & Massey, I. Y. (2019). Exposure routes and health effects of heavy metals on children. *Biometals*, 32(4), 563-573.
- Yuan, Y., Wu, Y., Ge, X., Nie, D., Wang, M., Zhou, H., & Chen, M. (2019). In vitro toxicity evaluation of heavy metals in urban air particulate matter on human lung epithelial cells. *Science of the Total Environment*, 678, 301-308.
- Zhang, K., Chai, F., Zheng, Z., Yang, Q., Zhong, X., Fomba, K. W., & Zhou, G. (2018). Size distribution and source of heavy metals in particulate matter on the lead and zinc smelting affected area. *Journal of Environmental Sciences*, 71, 188-196.