

REVISIÓN DE LA LITERATURA

VANADIO: EXPOSICIÓN ATMOSFÉRICA, EFECTOS EN LA SALUD Y NORMATIVIDAD EN MÉXICO

Vanadium: Atmospheric exposure, health effects and normativity in Mexico

Marcela ROJAS-LEMUS, Nelly LÓPEZ-VALDEZ, Patricia BIZARRO-NEVARES, Adriana GONZÁLEZ-VILLALVA y Teresa I. FORTOUL*

Laboratorio de Morfología y Toxicología, Departamento de Biología Celular y Tisular, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia: fortoul@unam.mx

(Recibido: julio de 2022; aceptado: agosto de 2023)

Palabras clave: contaminación atmosférica, metales, Normas Mexicanas.

RESUMEN

La contaminación atmosférica es uno de los grandes problemas a nivel global. Dentro de los contaminantes ambientales más importantes están las partículas suspendidas, las cuales han sido clasificadas dentro del Grupo 1 como carcinógenas para humanos por la Agencia Internacional sobre la Investigación en Cáncer. A las partículas suspendidas se adosan componentes con relevancia toxicológica como los metales a los que se les atribuyen, al menos en parte, los efectos adversos que las partículas generan en los organismos. Uno de los metales presentes en las partículas es el vanadio, metal que se encuentra como elemento traza abundante en el petróleo mexicano y que se emite a la atmósfera principalmente por la quema de sus derivados, como la gasolina. Sin embargo, aunque el vanadio está presente en la atmósfera, sus concentraciones no se monitorean, ya que ni *éste* ni algún otro metal están considerados como contaminantes criterio. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es darle visibilidad a este elemento como contaminante ubicuo adosado a las partículas suspendidas, ya que representa un potencial peligro para la salud de los habitantes de las ciudades contaminadas como la Zona Metropolitana del Valle de México y, por otro lado, enfatizar la casi nula de normatividad en México sobre la contaminación por metales, ya que el vanadio es solo un ejemplo de ésta.

Key words: atmospheric pollution, metals, Mexican regulations.

ABSTRACT

Air pollution is a major global problem. Among the most important environmental pollutants is particulate matter, which has been classified by the International Agency for Research on Cancer as a human carcinogen within Group 1. Toxicologically relevant

components such as metals are added to suspended particulate matter, which is at least partly responsible for the adverse effects of particulate matter on organisms. One of the metals present in particulate matter is vanadium, which is found as an abundant trace element in Mexican petroleum and is emitted into the atmosphere mainly by burning its derivatives, such as gasoline. However, although vanadium is present in the atmosphere, its concentrations are not monitored since neither vanadium nor any other metal are considered criteria pollutants. Therefore, the objective of this work is to give visibility to this element as a ubiquitous pollutant attached to suspended particles, which represents a potential danger to the health of the inhabitants of polluted cities such as the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico; and, on the other hand, to emphasize the near absence of regulations in Mexico on metal pollution, since vanadium is only one example.

INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas en la actualidad es la contaminación atmosférica, la cual tiene un fuerte impacto en el cambio climático y repercute en la salud pública e individual debido al aumento que acarrea en la morbilidad y mortalidad (Manisalidis et al. 2020). Esto, aunado a sus efectos perjudiciales para la salud, con especial énfasis en enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Dominski et al. 2021). Dentro de los contaminantes ambientales más peligrosos se encuentran las partículas suspendidas, ya que contienen agentes relevantes toxicológicamente como los metales, entre ellos el vanadio. Éste es un metal de transición que se emite a la atmósfera principalmente por la quema de combustibles fósiles, se adosa a las partículas suspendidas y se distribuye como contaminante ambiental al que están expuestos todos los habitantes (Rojas-Lemus et al. 2021). En 2013, la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC, por su sigla en inglés) determinó que existe evidencia suficiente para establecer una relación causal entre la exposición a partículas suspendidas y el cáncer en humanos, y lo catalogó como carcinógeno del Grupo 1. Dichos efectos se presentan a niveles que antes eran considerados como seguros (IARC 2013).

El objetivo de este trabajo es darle visibilidad al vanadio como un contaminante atmosférico al que se le da poca o nula importancia en México, ya que los metales son ubicuos y pueden causar efectos adversos sobre la salud. No obstante, ningún metal está considerado como contaminante criterio en la legislación mexicana sobre la calidad del aire o en el inventario de emisiones de la Ciudad de México de 2016 (SEDEMA 2021), lo que significa que sus concentraciones atmosféricas no se monitorean ni están normadas, y como ejemplo de ello tomamos el caso del vanadio.

VANADIO

Andrés Manuel del Río, español radicado en México, describió en 1801 un metal al que llamó “eritronio”. Sin embargo, la primicia del descubrimiento del vanadio como elemento nuevo le corresponde al sueco Nils Gabriel Sefström (Rehder 2017), quien lo nombró así en honor de la diosa escandinava del amor y la belleza: Vanadis (Treviño et al. 2019).

El vanadio (V) es un metal de transición miembro del grupo 5 de la tabla periódica (Imtiaz et al. 2015). Es un elemento bastante abundante en la corteza terrestre. Muestra una concentración de algo menos de 100 ppm, mucho mayor que la mayoría de los elementos (Yaroshevsky 2006); de hecho, constituye el elemento número 22 en abundancia (Treviño et al. 2019). Existe en estados de oxidación que van desde el -1 hasta el $+5$, mientras que los más comunes son $+3$, $+4$ y $+5$ (Tracey et al. 2007, Gustafsson 2019). No se le encuentra como vanadio puro porque forma parte de aproximadamente 70 minerales, puesto que es muy propenso a reaccionar con otros elementos, especialmente con el oxígeno con el que forma óxidos de vanadio (Barceloux 1999).

El vanadio desempeña un papel fundamental en varias aplicaciones industriales, especialmente en la producción de acero. Cuando se añade en pequeñas cantidades a determinadas aleaciones ferrosas, puede mejorar significativamente las propiedades y el rendimiento de la aleación. Además, se utilizan atributos específicos del vanadio para la producción de baterías de nueva generación que apoyan la inclusión de fuentes renovables de electricidad (Petranikova et al. 2020).

El pentóxido de vanadio es el compuesto comercial más empleado (Ivancsits et al. 2002) y es la materia prima principal para la producción de otros

compuestos de vanadio; por otro lado, es el más común en situaciones de exposición industrial (Dill et al. 2004).

Emisión atmosférica de vanadio

En 2003 la emisión mundial total de vanadio se calcula entre 71 000 y 210 000 t (Ress et al. 2003). Las fuentes antrópicas contribuyen con dos terceras partes del vanadio emitido a la atmósfera, específicamente en forma de óxidos (Barceloux 1999). Se considera que la quema de combustibles fósiles es la principal fuente antrópica de vanadio a la atmósfera (Schlesinger et al. 2017), junto con la actividad industrial (ATSDR 2016). Las fuentes naturales como polvos continentales, aerosoles marinos y, en menor medida, emisiones volcánicas, contribuyen con el resto del vanadio en el ambiente (Barceloux 1999).

Vanadio en el petróleo

El vanadio es uno de los dos metales más abundantes en el petróleo (Schlesinger et al. 2017), y constituye hasta el 50 % de los elementos traza que aparecen en los que provienen de Venezuela y del Golfo de México (Barceloux 1999). Por ejemplo, respecto del petróleo crudo, la mezcla mexicana Maya presenta 314 ppm de vanadio y la mezcla venezolana Tía Juana Pesado tiene 314 ppm, en comparación con la mezcla Louisiana Light Sweet de EUA, que sólo tiene 1.2 ppm. Por otra parte, los residuos atmosféricos de vanadio que se han estimado para estas mezclas son: 462 ppm para la Maya, 338 ppm para la Tía Juana Pesado y 3 ppm para la Louisiana Light Sweet (Stratiev et al. 2010,) y se estima una presencia del 12 al 15 % de vanadio en los derivados del petróleo, incluso después de ser procesados (Léonard y Gerber 1994).

Debido a que el vanadio es el elemento traza más abundante en los combustibles fósiles, la quema de éstos y sus derivados provee una fuente significativa de vanadio en el ambiente (de la Torre et al. 1999). Se calcula que el 90 % del vanadio emitido cada año a la atmósfera proviene principalmente de la combustión del petróleo (Dill et al. 2004) y sus derivados como la gasolina (Ávila-Costa et al. 2004). El consumo de combustibles fósiles es un factor importante en la emisión de vanadio a la atmósfera, ejemplo de ello es la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), donde en 2018 se estimó que el gasto energético anual de gasolina fue de 10 458 310 m³ (SEDEMA 2021), sin considerar otros tipos de combustibles como el diésel. La cifra mencionada aumenta con el paso del tiempo debido al incremento tanto en el parque vehicular, como en el número de habitantes.

El vanadio en las partículas suspendidas

La contaminación atmosférica ambiental es un importante factor de riesgo de morbilidad y mortalidad en todo el mundo (Santos et al. 2021). Dentro de los contaminantes emitidos, las partículas suspendidas (PM, por su sigla en inglés) son un indicador indirecto habitual de la contaminación atmosférica y se calcula que afectan a más personas que cualquier otro contaminante. Las PM son una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas, así como de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire, cuya composición varía de acuerdo con la región en la que se producen (Kim et al. 2015).

Las PM se generan principalmente por condensación de productos de la combustión (Pryor et al. 2022) o por reacciones químicas o fotoquímicas que se llevan a cabo en la atmósfera (Vallejo et al. 2003), y se clasifican por su tamaño, también llamado diámetro aerodinámico (Englert 2004). Las partículas inhalables son las que tienen un diámetro igual o menor a 10 mm y pueden ser (Kim et al. 2015):

- PM_{2.5}. Diámetro menor o igual a 2.5 mm. Composición: sulfato, nitrato, amonio, ion hidrógeno, carbono elemental, compuestos orgánicos, metales (plomo, cadmio, vanadio, níquel, cobre y zinc). Fuentes: combustión de carbón, petróleo, gasolina; industria metalúrgica como fundiciones y acerías.
- PM₁₀. Diámetro menor o igual a 10 mm. Composición: polvo en suspensión; cenizas de carbón y petróleo; óxidos metálicos; sal marina; polen, esporas de moho y partes de plantas. Fuentes: resuspensión de suelos arrastrados; suspensión de suelos alterados, por ejemplo por la agricultura y la minería; resuspensión de polvos industriales; polvos producto de la construcción y la combustión de carbón y petróleo; aerosoles marinos.

Las PM son un indicador clave de la contaminación atmosférica provocada por diversas actividades naturales y humanas. Por su tamaño pueden permanecer en suspensión durante mucho tiempo y recorrer grandes distancias en la atmósfera; por lo tanto, causar una amplia gama de enfermedades que implican una reducción significativa de la calidad de vida (Kim et al. 2015). Estudios epidemiológicos realizados en diferentes países han demostrado una asociación entre el incremento de las concentraciones de las PM y el aumento de mortalidad y morbilidad de sus poblaciones (Ghio et al. 2002), ya que dichas partículas penetran en el sistema respiratorio por inhalación provocando enfermedades respiratorias

y cardiovasculares, disfunciones reproductivas y del sistema nervioso central, y cáncer (Manisalidis et al. 2020).

Cuando son inhaladas, una vez dentro del sistema respiratorio son capaces de acumularse en diferentes sitios, como fosas nasales, laringe, tráquea, bronquios, bronquiolos y sacos alveolares (Rosales-Castillo et al. 2001). Se ha observado que conforme disminuye el tamaño de la partícula aumenta su toxicidad (Ghio et al. 2002), lo cual se debe a que las partículas más pequeñas tienen la capacidad de penetrar más profundamente en las vías respiratorias (Choi et al. 2004). La importancia de las PM radica en que son buenos receptores, contenedores y vehículos de componentes toxicológicamente relevantes (Vallejo et al. 2003). Un ejemplo de esto son los metales de transición, entre ellos el vanadio (Sorensen et al. 2005), que se adosa a la superficie de las PM y se distribuye como parte de los múltiples contaminantes ambientales, con la capacidad de ingresar en los organismos y causar efectos adversos sobre la salud (en lo cual se ahondará más adelante). Durante 2018 se emitieron a la atmósfera 20 860.78 t de PM₁₀ y PM_{2.5} sólo en la ZMVM, generadas exclusivamente por fuentes móviles (SEDEMA 2021) sin considerar el resto de las fuentes.

Vías de exposición a vanadio

Los organismos están expuestos al vanadio a través de dos *vías* principales: la oral y la inhalada. La primera se considera la más común (a través de los alimentos), pero la vía inhalada es la más importante debido a que a través del sistema respiratorio la absorción es mayor.

- Vía oral: para la población general, los alimentos son la mayor fuente de exposición a vanadio (Barceloux 1999, Ivancsits 2002, Mukherjee et al. 2004). Entre los alimentos ricos en vanadio se incluyen pimienta negra, hongos, perejil y espinacas (Barceloux 1999). En general, los alimentos de origen marino contienen mayores cantidades de vanadio comparados con los de origen terrestre (Barceloux 1999, Ivancsits 2002). Sin embargo, la absorción de compuestos de vanadio por el tracto gastrointestinal es pobre (Mukherjee et al. 2004), ya que sólo se absorbe < 1-2 % del metal ingerido (Barceloux 1999).

Inhalación: el vanadio es mejor absorbido y ampliamente distribuido en el organismo cuando es inhalado (WHO 2001). Por esta vía se absorbe hasta el 90 % de este metal (Léonard y Gerber 1994) por

lo que la inhalación es la ruta principal de entrada al organismo (Cooper 2007). El vanadio se adsorbe a la superficie de las partículas, especialmente a aquellas que tienen diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm , las cuales tienen la capacidad de entrar fácilmente hasta los sacos alveolares; una vez ahí, la mayor parte de lo inhalado se incorpora al torrente sanguíneo, lo que hace a esta *vía la mejor ruta de absorción*. En especial, los óxidos de vanadio se absorben fácilmente en los pulmones y entran en el torrente sanguíneo tras solubilizarse en forma de vanadato (Rehder 2013).

Toxicocinética y toxicodinámica del vanadio

Toxicocinética

Los estados biológicamente relevantes del vanadio son:

- El vanadato V(V), que es el estado pentavalente, usualmente como oxianión (p. ej., HVO_4^{2-} o H_2VO_4^+). Esta forma predomina en el espacio extracelular.
- El vanadilo V(IV), que es el estado tetravalente, usualmente como oxicación (p. ej., VO^{2+}), más estable y que predomina intracelularmente (Fortoul et al. 2002).

Tanto el vanadato como el vanadilo son las especies predominantes en la sangre (Rehder 2013). Aproximadamente el 90 % del vanadio en plasma se encuentra primordialmente como vanadilo unido a transferrina y albúmina (Barceloux 1999, Ivancsits 2002, Fortoul et al. 2002). Al continuar con el transporte en el plasma, la distribución del vanadio en el organismo es rápida (tiempo medio: 1 h [Barceloux 1999]); se acumula principalmente en hueso, riñón, hígado, bazo, y en menor grado en pulmones y testículos (Evangelou 2002).

Como catión libre, el vanadilo tiene habilidad limitada para atravesar las membranas celulares, pero el vanadato (V), que usualmente predomina en el espacio extracelular y se absorbe cinco veces más que el vanadilo a pH neutro (Mukherjee et al. 2004), entra en las células por medio de canales iónicos inespecíficos e intracelularmente es biorreducido a vanadilo (Barceloux 1999, Evangelou 2002). Esta biorreducción puede llevarse a cabo por glutatión celular, catecolaminas, cisteína, NADH, NADHP y L-ácido ascórbico (Rodríguez-Mercado et al. 2003), y subsecuentemente se une a proteínas (Evangelou 2002). Su reducción está regulada por los mecanismos redox de la célula que controlan el equilibrio de los estados de oxidación del vanadio (Evangelou 2002).

Intracelularmente, el vanadio se encuentra en estado tetravalente y se une a las fracciones citosólicas y nucleares. Una pequeña fracción (~1 %) puede encontrarse en forma libre (Evangelou 2002), además de pequeñas cantidades presentes en la célula que pueden permanecer unidas a las moléculas de grasa y por lo tanto no estar disponibles para producir toxicidad inmediata (Mukherjee et al. 2004).

La eliminación del vanadio del organismo es bifásica con una fase rápida (10-20 h) y una fase terminal larga (40-50 días) (Barceloux 1999, Ivancists et al. 2002). El vanadio que no es absorbido es excretado por vía urinaria, que es la ruta de eliminación principal y sólo una pequeña cantidad (< 10 %) es excretado por heces (Barceloux 1999).

Toxicodinámica

El vanadio puede ser tóxico para los seres humanos y algunos animales debido a que afecta importantes funciones celulares (Altamirano-Lozano et al. 1993). La similitud entre el vanadato y el fosfato explica la acción recíproca entre el vanadato y las enzimas dependientes del fosfato: las fosfatasa pueden inhibirse y las quinasas activarse (Rehder 2013). Por otro lado, la presencia de vanadio puede alterar la expresión de varios genes, p. ej., factor de necrosis tumoral- α (TNF- α), interleucina-8 (IL-8), proteína activadora 1 (AP-1), ras, c-raf, proteína activadora de genes mitógenos (MAPK), p53 y factores nucleares- $k\beta$ (NF- $k\beta$), entre otros (Mukherjee et al. 2004).

Efectos en la salud

Los efectos tóxicos de los compuestos de vanadio están relacionados con el organismo expuesto, la dosis, la ruta, la duración de la exposición y la naturaleza del compuesto (Evangelou 2002). Los óxidos de vanadio son *más tóxicos que las sales* (Evangelou 2002). Esto, aunado a que la toxicidad de los compuestos de vanadio aumenta conforme a su valencia; así, el estado pentavalente es el más tóxico para los mamíferos (Altamirano-Lozano et al. 1999).

Los signos y síntomas que se presentan como consecuencia de la exposición a vanadio son: irritación de mucosas (conjuntiva y respiratoria), coloración verde de la lengua, sabor metálico en la boca, tos, dificultad para respirar, bronquitis, epistaxis, disnea, eczema, conjuntivitis, cefalea, boca seca, mareo, nerviosismo, insomnio y temblor (WHO 2001).

El vanadio y sus compuestos tienen la capacidad de interactuar con los sistemas biológicos e interferir con la homeostasis del organismo, causando de esta manera efectos adversos a la salud, como se ha demostrado en los estudios experimentales realizados

en ratones, en los que se detalla que la inhalación de vanadio causa efectos reprotóxicos, neurotóxicos, hematotóxicos y hepatotóxicos, entre muchos otros (Rojas-Lemus et al. 2021). La evidencia experimental muestra que la inhalación de vanadio causa efectos sistémicos en los ratones expuestos, lo que realza la importancia de considerar una intervención para disminuir el riesgo a la salud que representa la presencia de este metal en el ambiente.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN A VANADIO

Internacionales

Instituciones internacionales como la Occupational Safety and Health Administration (OSHA 2017), el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH 2019) y la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH 2023) de EUA determinaron que el límite de exposición ocupacional a gases y polvos de vanadio es de 0.05 mg/m³ por un tiempo máximo de 8 h.

¿Existen límites de la exposición a vanadio en México?

En México sólo algunos contaminantes son considerados como “contaminantes criterio”, es decir, sus emisiones están reguladas por la Secretaría de Salud, la cual emite Normas Oficiales Mexicanas de Salud Ambiental que determinan las concentraciones atmosféricas recomendables para la protección de la salud humana. Los contaminantes criterio son: ozono, normados en la NOM-020-SSA1-2021 (SSA 2021a); monóxido de carbono, en la NOM-021-SSA1-1993 (SSA 1993a); dióxido de azufre, en la NOM-022-SSA1-2010 (SSA 2010); bióxido de nitrógeno, en la NOM-023-SSA1-1993 (SSA 1993b), y partículas suspendidas, en la NOM-025-SSA1-2021 (SSA 2021b). La emisión de plomo también está normada en la NOM-026-SSA1-2021 (SSA 2021c); sin embargo, no forma parte de la lista de contaminantes criterio, sino que se le considera un contaminante tóxico (SEDEMA 2021). En la legislación mexicana se menciona que, con el fin de medir la calidad del aire y contribuir al bienestar de la población, se han identificado ciertos contaminantes como nocivos para la salud de los seres humanos. Los valores criterio de calidad del aire establecen límites sobre las concentraciones de diversos contaminantes, con base en la protección de la salud de la población, iniciando con la más sensible; son parámetros de vigilancia de la calidad de aire y también establecen la referencia para la formulación de programas de control y evaluación,

lo que se realiza a través del Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM), que es el instrumento para la gestión de calidad del aire. Este inventario contiene la información de las emisiones liberadas a la atmósfera de los contaminantes criterio, que son: el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} , compuestos orgánicos volátiles, amonio y ozono (cuantificado por sus dos principales precursores, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (SEDEMA 2021). De acuerdo con el INEM, ningún metal es considerado como contaminante criterio; por lo tanto, tampoco hay legislación para ellos. Con esta óptica, los metales como contaminantes ambientales no representan riesgos, lo cual indica que en México no se considera importante o necesario implementar normas para evitar los riesgos a la salud por metales ni, en particular, por vanadio.

En esta revisión tomamos como ejemplo la ZMVM porque es la zona con mayor población y con mayores índices de contaminación ambiental en el país; está integrada por 16 alcaldías de la CDMX y por 59 municipios del Estado de México. Tiene una superficie de 7718 km² de los cuales la CDMX ocupa el 19 % y el 81 % restante son los municipios conurbados (SEDEMA 2021).

Es importante aclarar que esta zona no es la única del país que tiene problemas de contaminación ambiental, sólo que nos permite evidenciar la ausencia de normatividad mexicana respecto a la contaminación ambiental por metales.

Concentración ambiental de vanadio en la ZMVM

Las concentraciones de vanadio en México no se monitorean, sin embargo, existen grupos de investigación que han trabajado para identificar los daños que causa a la salud la exposición a este metal. En 2002, con muestras pulmonares de necropsias en las cuales se determinaron las concentraciones de varios metales por medio de espectrometría de absorción atómica, Fortoul et al. (2002) reportaron un aumento significativo (del 20 %, aproximadamente) en las concentraciones de vanadio en pulmones de ciudadanos que vivieron en la década de 1990, comparados con pobladores de la década de 1960. Gutiérrez-Castillo et al. (2006) observaron la presencia de vanadio, cadmio, cromo, cobre, fierro, zinc, manganeso y níquel en muestras de partículas suspendidas recolectadas en cuatro estaciones de monitoreo (zonas centro, sureste, noreste y noroeste) de la ZMVM. Lo anterior significa, que por medios indirectos (como la determinación de metales en tejido pulmonar) y directos (análisis de la composición química de las

PM), se ha demostrado la presencia de vanadio en la atmósfera de esta zona.

La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 (SSA 2014) establece que la mayoría de los estudios apunta a que el mayor impacto de las partículas sobre la salud es originado por compuestos altamente tóxicos y carcinogénicos; también menciona que el contenido soluble de vanadio, cobre y níquel en las partículas se asocia con la reactividad de éstas con el ADN. Asimismo, indica que estudios toxicológicos recientes sugieren que los metales contenidos en las partículas pueden estar relacionados con alteraciones neuro e inmunológicas. Llama la atención que esta información no estaba presente en la versión anterior de esta norma, la NOM-025-SSA1-1993 (SSA 1994), ni lo está en la norma vigente, que es la NOM-025-SSA1-2021 (SSA 2021b).

Situación actual de la ZMVM con relación a la emisión de contaminantes

La ZMVM presenta características topográficas y meteorológicas que la hacen muy susceptible a presentar altos niveles de contaminación (Vallejo et al. 2003), entre ellas: *i*) las cadenas montañosas que junto con las frecuentes inversiones térmicas atrapan a los contaminantes dentro de la cuenca; *ii*) la altitud a la que se encuentra (2240 msnm) determina que la concentración de oxígeno esté disminuida (-23 %) en relación con el nivel del mar y esto, a su vez, reduce la eficiencia de los motores de combustión interna y aumenta la concentración de monóxido de carbono e hidrocarburos (Vallejo et al. 2003, Molina y Molina 2004); *iii*) la altitud de la ciudad y la intensa luz solar también contribuyen a los procesos fotoquímicos para la formación de contaminantes secundarios (p. ej., ozono) (Molina y Molina 2004), y *iv*) la dirección de los vientos predominantes (de noreste a sureste) hace que la mayor concentración de contaminantes se encuentre en la zona sur de la ciudad, donde la Sierra del Ajusco obstaculiza su dispersión (Vallejo et al. 2003). Un ejemplo claro respecto del *último punto se documentó en el periodo 1992-1994*, en el cual se reportaron 81 episodios de contingencia ambiental por arriba de los 250 puntos en el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), de los cuales 58 ocurrieron en el suroeste, 12 en el noroeste, siete en el centro, tres en el sureste y uno en el noroeste. Es decir, la región más afectada de la ZMVM es justo aquella en la que no existen industrias (éstas se encuentran en el norte); sin embargo, la topografía de la ciudad evita que los contaminantes se dispersen.

Cuando el nivel puntos IMECA aumenta, los síntomas que se observan comúnmente en la población

son disnea (dificultad para respirar), cefalea (dolor de cabeza), conjuntivitis (inflamación de la conjuntiva), irritación de la mucosa respiratoria y tos productiva. Esto se debe a que, a grandes altitudes, las personas son más sensibles a enfermedades respiratorias que aquellas que viven al nivel del mar, porque a mayor altitud debe inhalarse más aire para obtener oxígeno suficiente; y, al mismo tiempo, se inhalan mayores cantidades de contaminantes (Molina y Molina 2004). Aun cuando las características propias de la ZMVM la hacen susceptible a problemas por contaminación y, por lo tanto, la población es propensa a padecer efectos desfavorables, actualmente no existe un programa de contingencia ambiental integral desarrollado para todas las áreas en México.

Se estima que la mitad del total de la energía producida en la ZMVM se emplea en el transporte, que es la mayor fuente de contaminación ambiental (SEDEMA 2021). Es importante mencionar que en la Norma Oficial Mexicana relativa a especificaciones de combustibles fósiles para la protección ambiental, la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SFCI-2005 (SEMARNAT 2005), se indican cuáles deben ser los límites fósiles de vanadio, níquel, hierro y cromo en los combustibles; sin embargo, no se ha determinado la cantidad permisible de estos metales en los combustibles que se utilizan actualmente.

El efecto combinado de las emisiones naturales y antrópicas, y las características topográficas y meteorológicas de la ZMVM favorecen la persistencia de contaminantes (Vallejo et al. 2003). El resultado es la degradación significativa del ambiente y la salud humana (Molina y Molina 2004). En este sentido, la Ley General de Salud contempla que, en materia de efectos del ambiente sobre la salud, las autoridades sanitarias establecerán las normas y medidas, y realizarán las actividades a que se refiere esta ley, tendientes a la protección de la salud humana ante los riesgos y daños dependientes de las condiciones del ambiente, así como a determinar la presencia de contaminantes atmosféricos y las concentraciones máximas permisibles de éstos para el ser humano. Asimismo, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y su reglamento en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, señalan que la calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y regiones del país, y que la Secretaría de Desarrollo Social expedirá, en coordinación con la Secretaría de Salud en lo referente a la salud humana, las normas oficiales correspondientes, especificando los niveles permisibles de emisión e inmisión por contaminante y por fuente de contaminación, de acuerdo con el regla-

mento respectivo. Por su parte, el Programa Nacional para la Protección al Medio Ambiente prescribe que, en materia de protección al ambiente, se cuente con los conocimientos científicos y técnicos que permitan incorporar en los procesos productivos, tecnologías que reduzcan al mínimo el impacto sobre el ambiente, así como definir e incluir criterios ecológicos para regular y optimizar las actividades productivas.

En la legislación mexicana se asume que es responsabilidad del Estado establecer las normas para determinar la concentración de contaminantes a la que puedan exponerse los habitantes de todos los asentamientos humanos del país sin que ésta implique riesgos a la salud; por ende, se deben identificar, cuantificar y determinar las concentraciones no peligrosas de los contaminantes ambientales, con el fin de garantizar la buena calidad del aire para todos los ciudadanos. Sin embargo, la realidad actual de México es que sólo algunos contaminantes ambientales se monitorean, a pesar de que está bien documentado que hay otros elementos toxicológicamente relevantes que tienen la capacidad de generar daños a la salud, cuya presencia en el ambiente no es considerada como factor importante en el detrimento de la calidad del aire.

PERSPECTIVAS

Un buen comienzo para mejorar la calidad del aire es disminuir la emisión de PM (especialmente aquellas con diámetro menor o igual a $2.5 \mu m$). La reducción en las emisiones de PM podría lograrse si se implementan medidas como la mejora de las vialidades (ya que las PM se desprenden de caminos sin asfaltar o con el asfalto dañado), la sustitución de unidades de transporte público con modelos eléctricos o híbridos, el aumento de la inversión en la red de transporte público para que sea más eficiente y, un punto fundamental, la reforestación de áreas verdes.

Por otro lado, aunque el petróleo y sus derivados no dejarán de utilizarse en un futuro cercano (a pesar de que el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania que inició en 2022 desencadenó una tendencia a disminuir la dependencia en combustibles fósiles), debe establecerse —como indica la Norma Oficial Mexicana sobre las especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental (SEMARNAT 2005)— la concentración permisible de vanadio en el crudo, para regular la cantidad de este metal emitida a la atmósfera por esa fuente. En este sentido, para conocer y normar las concentraciones ambientales no sólo del vanadio sino de otros metales de importancia

toxicológica como el cadmio, el manganeso, el cromo y el níquel, es importante cuantificarlos.

CONCLUSIÓN

Cada habitante de la ZMVM respira diariamente en promedio 10 000 litros de aire, mismo que contiene el oxígeno esencial para la vida y, al mismo tiempo, elementos que pueden ser (de acuerdo con la cantidad) inocuos o peligrosos. Por un lado, es necesaria la investigación para determinar el límite entre ambos extremos y, por otro, es esencial legislar para que se respeten los límites establecidos y los ciudadanos de todos los ámbitos sean los responsables de llevar a cabo las acciones necesarias para lograr y mantener una atmósfera de calidad apropiada. Actualmente en México no se lleva a cabo el monitoreo ambiental de metales relevantes para la salud como el vanadio, ni existen normas que determinen sus valores máximos permisibles. Lo anterior no significa que el problema deba ser ignorado sino que cada miembro de la sociedad y del Estado asuma y ejecute las responsabilidades correspondientes, de tal manera que se apliquen de manera efectiva las medidas y normas establecidas en la legislación, con el fin de alcanzar y mantener mejor calidad de aire. Como se lee en el primer párrafo introductorio de la NOM-025-SSA1-2014 que establece los valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas (SSA 2014), a pesar de los esfuerzos realizados por los diferentes órdenes de gobierno y la iniciativa privada en cuanto a la medición y cumplimiento del marco jurídico vigente, la contaminación del aire continúa siendo uno de los problemas de salud pública más importantes que afectan a la población a nivel nacional (SSA 2014).

REFERENCIAS

- ACGIH (2023). Vanadium pentoxide. American Conference of Governmental Industrial Hygienists [en línea]. <https://www.acgih.org/vanadium-pentoxide/> 20/06/23
- Altamirano-Lozano M., Álvarez-Barrera L. y Roldán-Reyes E. (1993). Cytogenic and teratogenic effects of vanadium pentoxide on mice. *Medical Science Research* 21 (19), 711-713.
- Altamirano-Lozano M., Valverde M., Álvarez-Barrera L., Molina B. y Rojas E. (1999). Genotoxic studies of vanadium pentoxide (V₂O₅) in male mice. II. Effects in several mouse tissues. *Teratogenesis, Carcinogenesis, and Mutagenesis* 19 (4), 243-255. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1520-6866\(1999\)19:4%3C243::aid-tcm1%3E3.0.co;2-j](https://doi.org/10.1002/(sici)1520-6866(1999)19:4%3C243::aid-tcm1%3E3.0.co;2-j)
- ATSDR (2016). Resúmenes de salud pública. Vanadio (vanadium). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [en línea]. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_ph58.html#:~:text=Fuentes%20atmosféricas%20naturales%20de%20vanadio,y%20carbón%20ricos%20en%20vanadio 25/06/23
- Ávila-Costa M.R., Flores E.M., Colín-Barenque L., Ordóñez J.L., Gutiérrez A.L., Niño-Cabrera H.G. y Fortoul T.I. (2004). Nigrostriatal modifications after vanadium inhalation: an immunocytochemical and cytological approach. *Neurochemical Research* 29 (7), 1365-1369. <https://doi.org/10.1023/b:nere.0000026398.86113.7d>
- Barceloux D.G. (1999). Vanadium. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology* 37 (2), 265-278. <https://doi.org/10.1081/clt-100102425>
- Choi J.H., Kim J.S., Kim Y.C., Kim Y.S., Chung N.H. y Cho M.H. (2004). Comparative study of PM_{2.5}- and PM₁₀-induced oxidative stress in rat lung epithelial cells. *Journal of Veterinary Science* 5 (1), 11-18.
- Cooper R.G. (2007). Vanadium pentoxide inhalation. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine* 11 (3), 97. <https://doi.org/10.4103/0019-5278.38457>
- De la Torre A., Granero S., Mayayo E., Corbella J. y Domingo J.L. (1999). Effect of age on vanadium nephrotoxicity in rats. *Toxicology Letters* 105 (1), 75-82. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(98\)00385-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(98)00385-3)
- Dill J.A., Lee K.M., Mellinger K.H., Bates D.J., Burka L.T. y Roycroft J.H. (2004). Lung deposition and clearance of inhaled vanadium pentoxide in chronically exposed F344 rats and B6C3F1 mice. *Toxicological Sciences* 77 (1), 6-18. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfh005>
- Dominski F.H., Lorenzetti Branco J.H., Buonanno G., Stabile L., Gameiro da Silva M. y Andrade A. (2021). Effects of air pollution on health: A mapping review of systematic reviews and meta-analyses. *Environmental Research* 201, 111487. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111487>
- Englert N. (2004). Fine particles and human health—A review of epidemiological studies. *Toxicology Letters* 149 (1-3), 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2003.12.035>
- Evangelou A.M. (2002). Vanadium in cancer treatment. *Critical Reviews in Oncology/Hematology* 42 (3), 249-265. [https://doi.org/10.1016/S1040-8428\(01\)00221-9](https://doi.org/10.1016/S1040-8428(01)00221-9)
- Fortoul T.I., Quan-Torres A., Sánchez I., López I.E., Bizarro P., Mendoza M. L. y Colín-Barenque L. (2002). Vanadium in ambient air: Concentrations in lung tissue from autopsies of Mexico City residents in the 1960s and 1990s. *Archives of Environmental Health: An International Journal* 57 (5), 446-449. <https://doi.org/10.1080/00039890209601436>

- Ghio A.J., Silbajoris R., Carson J.L. y Samet J.M. (2002). Biologic effects of oil fly ash. *Environmental Health Perspectives* 110 (1), 89. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110s1189>
- Gustafsson I.P. (2019). Vanadium geochemistry in the biosphere—Speciation, solid-solution interaction, and ecotoxicity. *Applied Geochemistry* 102, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.12.027>
- Gutiérrez-Castillo M.E., Roubicek D.A., Cebrián-García M.E., de Vizcaya-Ruiz A., Sordo-Cedeño M. y Ostrosky-Wegman P. (2006). Effect of chemical composition on the induction of DNA damage by urban airborne particulate matter. *Environmental and Molecular Mutagenesis* 47 (3), 199-211. <https://doi.org/10.1002/em.20186>
- IARC (2013). Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. International Agency for Research on Cancer. World Health Organization [en línea]. <https://www.iarc.who.int/news-events/iarc-outdoor-air-pollution-a-leading-environmental-cause-of-cancer-deaths/> 23/06/23
- Imtiaz M., Rizwan M.S., Xiong S., Li H., Ashraf M., Shahzad S.M., Shahzad M., Rizwan M. y Tu S. (2015) Vanadium, recent advancements and research prospect: A review. *Environment International* 80, 79-8. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.03.018>
- Ivancsits S., Pilger A., Diem E., Schaffer A. y Rüdiger H.W. (2002). Vanadate induces DNA strand breaks in cultured human fibroblasts at doses relevant to occupational exposure. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 519 (1), 25-35. [https://doi.org/10.1016/S1383-5718\(02\)00138-9](https://doi.org/10.1016/S1383-5718(02)00138-9)
- Kim K.H., Kabir E. y Kabir S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environmental International* 74, 136-43. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Léonard A. y Gerber G.B. (1994). Mutagenicity, carcinogenicity, and teratogenicity of vanadium compounds. *Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology* 317 (1), 81-88. [https://doi.org/10.1016/0165-1110\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0165-1110(94)90013-2)
- lidis I., Stavropoulou E., Stavropoulos A. y Bezirtzoglou E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health* 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Molina M.J. y Molina L.T. (2004). Megacities and atmospheric pollution. *Journal of the Air and Waste Management Association* 54 (6), 644-680. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470936>
- Mukherjee B., Patra B., Mahapatra S., Banerjee P., Tiwari A. y Chatterjee M. (2004). Vanadium—An element of atypical biological significance. *Toxicology Letters* 150 (2), 135-143. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2004.01.009>
- NIOSH (2019). Pocket guide to chemical hazards. Vanadium dust. National Institute of Occupational Safety and Health. Centers for Disease Control and Prevention [en línea]. www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0653.html 25/06/23
- OSHA (2017). Permissible exposure limits—Annotated tables. Occupational Safety and Health Administration [en línea]. <https://www.osha.gov/annotated-pels/table-z-1> 25/06/23
- Petranikova M., Tkaczyk A.H., Bartl A., Amato A., Lapkovskis V. y Tunsu C. (2020) Vanadium sustainability in the context of innovative recycling and sourcing development. *Waste Management* 113, 521-544. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.007>
- Pryor J.T., Cowley L.O. y Simonds S.E. (2022). The physiological effects of air pollution: Particulate matter, physiology, and disease. *Frontiers on Public Health* 10, 882569. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.882569>
- Rehder D. (2013). Vanadium. Its role for humans. *Met Ions in Life Sciences* 13, 139-69. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7500-8_5
- Rehder D. (2017). Implications of vanadium in technical applications and pharmaceutical issues. *Inorganica Chimica Acta* 55, 378-389. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2016.06.021>
- Ress N.B., Chou B.J., Renne R.A., Dill J.A., Miller R.A., Roycroft J.H. y Bucher J.R. (2003). Carcinogenicity of inhaled vanadium pentoxide in F344/N rats and B6C3F1 mice. *Toxicological Sciences* 74 (2), 287-296. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfg136>
- Rodríguez-Mercado J.J., Roldán-Reyes E. y Altamirano-Lozano M. (2003). Genotoxic effects of vanadium (IV) in human peripheral blood cells. *Toxicology Letters* 144 (3), 359-369. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(03\)00255-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(03)00255-8)
- Rojas-Lemus M., López-Valdez N., Bizarro-Nevarés P., González-Villalva A., Ustarroz-Cano M., Zepeda-Rodríguez A., Pasos-Nájera F., García-Peláez I., Rivera-Fernández N. y Fortoul T.I. (2021). Toxic effects of inhaled vanadium attached to particulate matter: A literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 10, 18 (16), 8457. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168457>
- Rosales-Castillo J.A., Torres-Meza V.M., Olaiz-Fernández G. y Borja-Aburto V.H. (2001). Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos. *Salud Pública de México* 43, 544-555. <https://doi.org/10.1590/S0036-36342001000600005>
- Santos U.P., Arbex M.A., Braga A.L.F., Mizutani R.F., Caçado J.E.D., Terra-Filho M. y Chatkin J.M. (2021). Environmental air pollution: Respiratory effects. *Jornal*

- Brasileiro de Pneumologia 47 (1), e20200267. <https://doi.org/10.36416/1806-3756/e20200267>
- Schlesinger W.H., Klein E.M. y Vengosh A. (2017). Global biogeochemical cycle of vanadium [Review]. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (52), E11092-E11100. <https://doi.org/10.1073/pnas.1715500114>
- SEDEMA (2021). Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Proyectos de Calidad del Aire, Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [en línea]. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2018/Inventario-de-emisiones-cdmx-2018.pdf> 25/05/23
- SEMARNAT (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SFCI-2005. Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*, México, 2 de diciembre.
- Sorensen M., Schins R.P., Hertel O. y Loft S. (2005). Transition metals in personal samples of PM_{2.5} and oxidative stress in human volunteers. *Cancer Epidemiology and Prevention Biomarkers* 14 (5), 1340-1343. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-04-0899>
- SSA (1993a). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. *Diario Oficial de la Federación*, México, 11 de noviembre.
- SSA (1993b). Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. *Diario Oficial de la Federación*, México, 11 de noviembre.
- SSA (1994). Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, partículas menores de 10 micras (PM₁₀). Valor permisible para la concentración de partículas menores de 10 micras en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. *Diario Oficial de la Federación*, México, 18 de enero.
- SSA (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. *Diario Oficial de la Federación*, México, 18 de junio.
- SSA (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014. Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Secretaría de Salud. *Diario oficial de la Federación*, México, 20 de agosto.
- SSA (2021a). Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2021. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al ozono (O₃). Valores normados para la concentración de ozono en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. *Diario Oficial de la Federación*, México, 25 de septiembre.
- SSA (2021b). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. *Diario Oficial de la Federación*, México, 27 de septiembre.
- SSA (2021c). NORMA Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-2021. Salud Ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. Secretaría de Salud. *Diario Oficial de la Federación*, México, 29 de septiembre.
- Stratiev D., Dinkov R., Petkov K. y Stanulov K. (2010). Evaluation of crude oil quality. *Petroleum and Coal* 52 (1), 35-43.
- Tracey A.S., Willsky G.R. y Takeuchi E.S. (2007). Vanadium: Chemistry, biochemistry, pharmacology and practical applications. CRC Press, Boca Ratón, EUA, 250 pp. <https://doi.org/10.1201/9781420046144>
- Treviño S., Díaz A., Sánchez-Lara E., Sanchez-Gaytan B.L., Perez-Aguilar J.M. y González-Vergara E. (2019). Vanadium in biological action: Chemical, pharmacological aspects, and metabolic implications in diabetes mellitus. *Biological Trace Element Research* 188 (1), 68-98. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1540-6>
- Vallejo M., Jáuregui-Renaud K., Hermosillo A. G., Márquez M. F. y Cárdenas M. (2003). Efectos de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la Ciudad de México. *Gaceta Médica de México* 139 (1), 57-63.

WHO (2001). International Program on Chemical Safety. Concise international chemical assessment document. Vanadium pentoxide and other inorganic vanadium compounds. World Health Organization [en línea]. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42365/9241530294.pdf?sequence=1> 25/05/23

Yaroshevsky A.A. (2006). Abundances of chemical elements in the Earth's crust. *Geochemistry International* 44, 48-55. <https://doi.org/10.1134/S001670290601006X>