

Angélica Neria-Hernández

ORCID iD: [0000-0003-1673-8029](https://orcid.org/0000-0003-1673-8029)

Araceli Amaya Chávez

ORCID iD: [0000-0001-9798-0882](https://orcid.org/0000-0001-9798-0882)

Rodrigo Castañeda Sandoval

Carlos Aguirre Campuzano

Capítulo 2

Dióxido de azufre

Páginas 45-71

En:

Química de los contaminantes atmosféricos. Libro número 1 / Violeta Múgica Álvarez, editora. Ciudad de México: Sociedad Química de México, 2023.

ISBN: 978-607-69750-1-5

Universidad
Autónoma
Metropolitana
Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco
<https://www.azc.uam.mx/>



SOCIEDAD QUÍMICA
DE MÉXICO, A.C.
"La química nos une"



Temas Contemporáneos de Química



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como
Atribución-NoComercial-SinDerivadas

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

A stylized graphic of a sulfur dioxide (SO2) molecule is centered on the page. It features a central sulfur atom (represented by a dark green sphere) bonded to two oxygen atoms (represented by dark blue spheres). The bonds are shown as double lines. The background is a gradient of blue and grey.

CAPÍTULO 2

DIÓXIDO DE AZUFRE

Angélica Neria Hernández

Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma del Estado de México

Araceli Amaya Chávez

Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma del Estado de México

Rodrigo Castañeda Sandoval

Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México

Carlos Aguirre Campuzano

Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México

2.1 Introducción

El dióxido de azufre es un compuesto inorgánico formado por dos átomos de oxígeno unidos mediante enlaces covalentes polares a un átomo de azufre, por lo que su fórmula molecular es SO_2 (Figura 2.1). De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), su nombre oficial es dióxido de azufre, aunque también puede ser conocido como anhídrido sulfuroso.

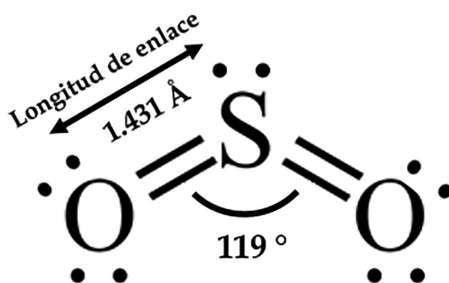


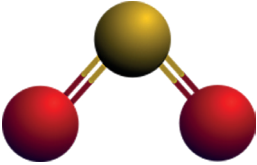
Figura 2.1 Estructura electrónica del dióxido de azufre.

De acuerdo a la Teoría del Enlace Molecular, el SO_2 se forma por dos enlaces dobles entre el azufre y el oxígeno ($\text{O} = \text{S} = \text{O}$), para lo cual es necesario que el átomo central (S) promueva a un estado excitado a uno de sus electrones del orbital 3p al 4s. Por su parte, el oxígeno tiene un electrón desapareado en orbitales 4p, formándose enlaces σ y π . El dióxido de azufre tiene tres modos de vibración principales (es una molécula no lineal con $N = 3$, átomos, así que tiene $3N - 6 = 3$ grados de libertad vibracionales). Éstos son: el estiramiento simétrico ν_1 , el doblamiento ν_2 y el estiramiento antisimétrico ν_3 (Arellano, 2005).

2.2 Propiedades fisicoquímicas

El SO_2 está presente como un gas a condiciones normales de temperatura y presión, ya que su punto de ebullición es $-10.05\text{ }^\circ\text{C}$ (Haynes, 2015), por debajo de esta temperatura ocurre la licuefacción o bien a temperatura ambiente con un incremento de presión. En estado gaseoso, es más pesado que el aire ya que su densidad de vapor relativa es 2.26, con respecto al aire que es de 1 (OSHA, 2023). En cuanto a sus propiedades organolépticas, es un gas incoloro, con olor picante y sofocante y con gusto ácido ya que es muy soluble en agua (11.3 g/100 g de agua a $20\text{ }^\circ\text{C}$) y forma ácido sulfuroso (INSST, 2014), por lo que es irritante en mucosas. Su olor es detectable a partir de 0.33 ppm (Haz-map, 2023). En la Tabla 2.1 se resumen las principales propiedades fisicoquímicas del dióxido de azufre.

Tabla 2.1 Propiedades fisicoquímicas del dióxido de azufre (PubChem, 2023).

Molécula	Propiedad	Valor
	Fórmula molecular	SO ₂
	Peso molecular	64.07 g/mol
	Estado de agregación a NTP	Gaseoso
	Color	Incoloro
	Olor	Picante y sofocante
	Umbral bajo de olor	0.33 ppm
	Sabor	Ácido
	Punto de ebullición	-10.05 °C
	Punto de fusión	-75.5 °C
	Solubilidad en agua	11.3 g/100 g de agua a 20 °C
	Densidad relativa (agua = 1)	1.4 (líquido, -10 °C)
	Densidad de vapor relativa (aire=1)	2.26
	Calor de vaporización	172.3 Btu/lb (1 atm)

El SO₂ es un agente reductor por lo que en la industria tiene diversos usos como blanqueador, antiséptico, preservante y catalizador, así como en la fabricación del ácido sulfúrico y sulfitos (INSST, 2014). También fue usado ampliamente como refrigerante, ya que tiene un calor de vaporización en el punto de ebullición a 1 atm de 172.3 Btu/lb (Intersam, 2022), por lo que tiene buena capacidad de absorber calor debido a su baja temperatura a bajas presiones, sin embargo, fue sustituido como refrigerante por su alta toxicidad y propiedades corrosivas. El dióxido de azufre líquido produce una corrosión grave del hierro, el latón y el cobre con un contenido de humedad de alrededor del 0.2% en peso o superior (Weil *et al.*, 2005).

El SO₂ tiene la propiedad de generar fluorescencia visible inducida por radiación UV, esto ocurre cuando las moléculas de SO₂ son excitadas por una fuente de UV pulsada, este estado excitado es inestable por lo que el SO₂ excitado decae rápidamente a su nivel de energía del estado fundamental. Durante este proceso, ocurre la fluorescencia, es decir, se emite luz ultravioleta con una longitud de onda diferente a la de la fuente original y esta luz ultravioleta generada es proporcional a la cantidad de SO₂ (EST, 2023), esta propiedad es de gran utilidad para su medición. Las ecuaciones (2.1) y (2.2) muestran este proceso:



La molécula de SO_2 posee una simetría π en el orbital desocupado de menor energía (LUMO), la cual le confiere propiedades electrofílicas (por ejemplo, de adición a reactivos organometálicos). Asimismo, posee un orbital molecular ocupado por un solo electrón (SOMO) suficientemente estable para participar en reacciones con radicales (Emmett y Willis, 2015).

2.3 Fuentes de emisión

El dióxido de azufre se genera a partir de la oxidación del azufre presente en diversos compuestos, como se presenta en la ecuación (2.3) (EST, 2023):



Los compuestos de azufre están presentes en el petróleo en formas como sulfuro de hidrógeno, sulfuros minerales, dióxido de azufre, mercaptanos, tiofenos, benzotiofenos y dibenzotiofenos. Estos compuestos de azufre son perjudiciales para los procesos de la refinería debido a los problemas que ocasionan como son: envenenamiento de catalizadores, corrosión de las plantas y contaminación atmosférica (Bajja *et al.*, 2017). Derivado de estos inconvenientes, así como de las regulaciones ambientales nacionales e internacionales que limitan el contenido de azufre en los combustibles, las refinерías aplican diversos procesos para la desulfuración del petróleo y sus derivados, mediante procesos de absorción o extracción con corrientes de nitrógeno (stripping), aunque la alternativa más común es la quema en antorcha que se utiliza para quemar gases que, de otro modo, presentarían un problema de seguridad. Es común la quema gas natural que contiene sulfuro de hidrógeno para convertir éste en compuestos menos tóxicos (Q2technologies, 2023). En las antorchas, el H_2S se oxida a SO_2 y se emite a la atmósfera como un contaminante criterio.

El azufre está presente en diversos combustibles fósiles comúnmente usados como el diésel, combustible de aviones, keroseno y combustóleo, entre otros (Iqrash *et al.*, 2020), por lo que, durante la combustión de estos energéticos, el azufre presente es oxidado a dióxido de azufre y se emite a la atmósfera.

Otra fuente de emisión de SO_2 es la quema de biomasa, como residuos agrícolas, leña, carbón y residuos orgánicos. Las emisiones se deben a que el azufre presente en tejidos vegetales y animales se oxida a SO_2 durante la quema de biomasa. Los aminoácidos que contienen azufre, como son la metionina (Met) y la cisteína (Cys), son necesarios para todas las formas de vida para la síntesis de proteínas y muchas otras funciones biológicas (Figura 2.2). Estos dos aminoácidos se derivan de la reducción asimilatoria del sulfato, combinada con la incorporación a moléculas orgánicas que se encuentran ampliamente en bacterias, hongos, levaduras y plantas (Droux *et al.*, 2000).

Dióxido de azufre

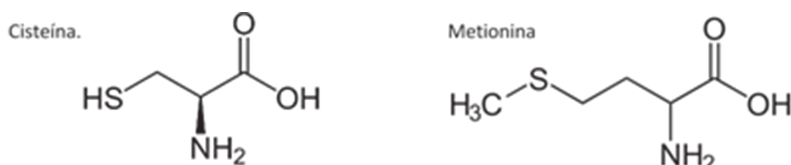


Figura 2.2 El azufre presente en las biomoléculas de la vida.

Con base en el Inventario Nacional de Emisiones 2016, elaborado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), las fuentes de emisión principales del SO₂ pueden clasificarse en Fuentes Fijas, Fuentes Móviles y Fuentes de Área, como se observa en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Emisiones de SO₂ por categoría (SEMARNAT, 2016).

Categoría	Toneladas	Porcentaje
Fuentes Fijas	1,314,310.28	97%
Fuentes Móviles	28,987.80	2%
Fuentes de Área	17,640.36	1%
TOTAL	1,360,938.44	100%

En la Tabla 2.3 y la Figura 2.3 se presenta el desglose de las fuentes fijas, detallando los tipos de industrias más representativos en materia de emisión de SO₂.

Tabla 2.3 Emisiones de SO₂ por tipo de industrias (SEMARNAT, 2016).

Número	Tipo	Toneladas	Porcentaje
1	Generación de energía eléctrica	683,849.89	52%
2	Petróleo y petroquímica	513,248.32	39%
3	Cemento y cal	33,987.03	3%
4	Alimentos y bebidas	31,764.69	2%
5	Metalúrgica (incluye la siderúrgica)	20,224.13	2%
6	Química	16,458.78	1%
7	Celulosa y papel	7,630.59	1%
8	Otras industrias	7,146.86	1%
	Total	1,314,310.28	

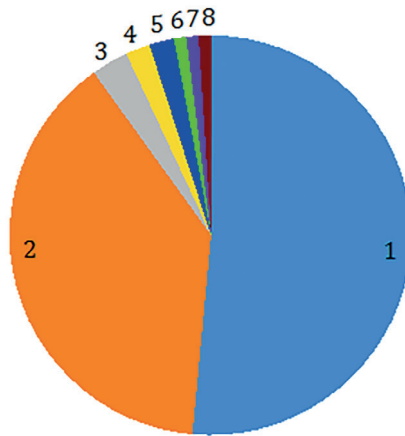


Figura 2.3 Distribución de las Emisiones de SO₂ por tipo de industria (SEMARNAT, 2016).

En cuanto a las fuentes móviles, las que más contribuyen a la emisión de SO₂ son los autos particulares con 18%, las pickup y vehículos < 3.8 Ton con 16%, los vehículos >3.8 Ton con 14%, los tractocamiones con 12% y los autobuses con 9%, entre otros. En las fuentes de área, las principales categorías son las fuentes misceláneas con 44.4%, las fuentes agropecuarias con 33.8% y la quema de combustibles fósiles en fuentes estacionarias con 21.8%, entre otras (SEMARNAT, 2023).

Las fuentes naturales no están reportadas en el inventario nacional debido a la complejidad de su cuantificación, pero cabe mencionar que la actividad volcánica es una fuente de emisión considerable de SO₂, debido al contenido de azufre en el magma, en donde el azufre se deriva de la mezcla entre dacita saturada de anhídrita y basalto saturado de sulfuro, un proceso que forzaría a ambas fases que contienen azufre a salir fuera de su campo de estabilidad y expulsaría al azufre del magma (Hoog, Hattori y Hoblitt, 2004). Grutter *et al.*, (2008) midieron las emisiones de dióxido de azufre del volcán Popocatepetl en el centro de México durante la campaña MILAGRO en 2006 y reportaron un valor de 2.45 ± 1.39 Gg/día de SO₂ de todos los promedios diarios obtenidos durante el mes de marzo de 2006.

A nivel mundial, las emisiones SO₂ por región así como las principales fuentes se resumen en la Figura 2.4. Estos estimados fueron hechos por Smith *et al.*, (2011) con base en los inventarios de emisiones de varios países y mediante modelos para estimar las emisiones globales de SO₂.

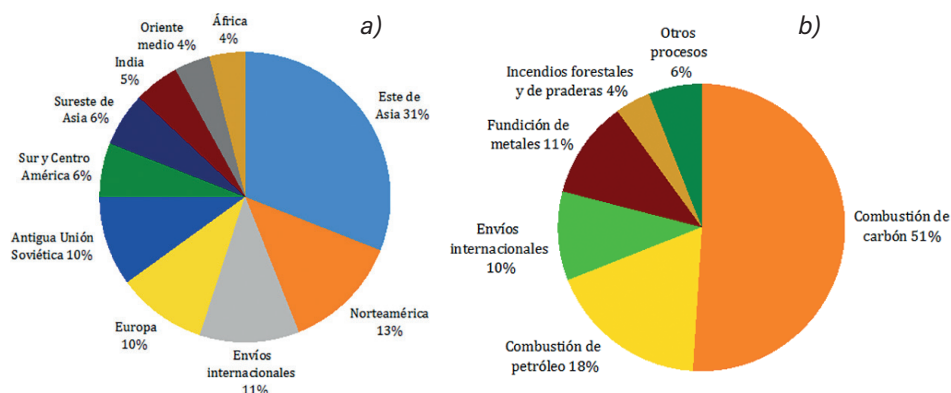


Figura 2.4a Emisión Global de SO₂ por región y **2.4b** principales fuentes (adaptado de Smith et al., 2011).

2.4 Comportamiento químico en la atmósfera

El dióxido de azufre es un contaminante primario, ya que es emitido directamente por sus diversas fuentes a la atmósfera. Una vez en la atmósfera en presencia de nubes, el SO₂ pasa rápidamente a la fase líquida y se convierte en ácido sulfúrico (H₂SO₄), por lo que su tiempo de vida es de pocas horas (Ecuación 2.4).



En ausencia de nubes, la conversión del SO₂ en H₂SO₄ tiene lugar en la fase gaseosa como se muestra en las ecuaciones (2.5), (2.6) y (2.7), lo que resulta en un tiempo de vida mucho más prolongado, de varios días. En la estratósfera seca, particularmente en la estratósfera inferior donde la concentración de OH• es relativamente pequeña, el tiempo de vida del SO₂ es más largo que en la tropósfera y es del orden de varias semanas (Khokhar et al., 2005).



El ácido sulfúrico que se produce a partir de la oxidación de óxidos de azufre, puede absorberse en las gotas de agua de las nubes, disminuyendo su valor de pH y da lugar a la formación de lluvia ácida (pH < 5), la cual ocasiona daños a las plantas forestales y agrícolas, acidificación de suelos y aguas y corrosión de edificios y monumentos (US-EPA, 2023a).

Por otra parte, el H_2SO_4 también puede interactuar con los aerosoles existentes y condensarse sobre estos, formando aerosoles de sulfato secundario en el modo de acumulación. Otra ruta es mediante procesos de nucleación homogénea, donde se genera una niebla de H_2SO_4 , la cual posteriormente puede reaccionar con NH_3 atmosférico y formar partículas de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y/o NH_4HSO_4 (Khoder, 2002). El NH_3 es emitido a la atmósfera por procesos de descomposición de materia orgánica que ocurren en los relleños sanitarios y en aguas residuales así como por procesos industriales.

Los aerosoles de sulfato presentes en la atmósfera alteran la trayectoria de la radiación solar ocasionando un efecto de dispersión, así mismo, pueden servir también como núcleos de condensación de nubes o partículas de nucleación de hielo, que modifican la reflectividad y la vida útil de las nubes a través de procesos microfísicos. En conjunto, estas influencias se cuantifican como forzamiento de aerosoles: el cambio del flujo radiativo neto a un nivel específico de la atmósfera que tiene una relación directa con el balance energético de la Tierra y, por lo tanto, con el clima (Pattantyus *et al.*, 2018).

De acuerdo con Kaufman *et al.*, (2002), los efectos de los aerosoles sobre el clima difieren de los de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), debido a que los aerosoles de sulfato son altamente reflectantes, elevan el albedo de nuestro planeta, enfriando así la superficie y contrarrestando el calentamiento de los gases de efecto invernadero en un rango de 25 a 50%. Con base en esto, varios proyectos de mitigación del calentamiento global consideran una geoingeniería de inyección estratosférica de aerosoles reflectantes de sulfato para reducir temporalmente los impactos del calentamiento global (Lee *et al.*, 2023).

2.5 Daños al medio ambiente

Con base en la reactividad de la molécula de dióxido de azufre, los efectos de la exposición a este gas y sus subproductos van más allá de los daños a la salud revisados anteriormente, pero también hay gran variedad de impactos al ambiente como son daños a la fauna, a la vegetación silvestre y agrícola, e incluso a los materiales de diversas estructuras.

En cuanto a los daños a la fauna, los estudios en animales han demostrado que el SO_2 produce irritación ocular a 6 ppm/4h en conejos (HSBD, 2023). Así como también después de una exposición de 120 horas a una concentración de SO_2 de 1.1 ppm, los conejillos de indias mostraron neumonía intersticial proliferativa, bronquitis y traqueítis y un mayor contenido de histamina en los pulmones, mientras que la exposición a 0.06 ppm de SO_2 durante un mes provocó cambios intersticiales en el tracto respiratorio. Las ratas expuestas mostraron dificultad para respirar, disminución del peso corporal y una inflamación aguda con infiltrados de neutrófilos y macrófagos en las vías respiratorias 5 h después de la exposición. Los efectos agudos se caracterizaron por daño bronquial restringido a los bronquios más grandes con revestimiento epitelial mucoso lesionado generalizado. Las ratas mostraron vías respiratorias hiperreactivas 24 h después de la exposición, como lo indica el aumento de la resistencia respiratoria inducida por la metacolina.

En ratas expuestas continuamente a SO_2 durante 5 meses (0.7 ppm y 7.0 ppm), aumentó la actividad de la colinesterasa sérica y la aspartato aminotransferasa y provocó

cambios morfológicos en el tracto respiratorio, además de mostrar efectos agudos en daño bronquial 5 h después de la exposición (Wigenstom *et al.*, 2016). La exposición prolongada de perros a altas concentraciones de SO₂ (200 ppm) causó un síndrome similar a la bronquitis crónica humana, que involucra obstrucción crónica de las vías respiratorias, inflamación de las vías respiratorias y síntomas de tos e hipersecreción de moco. En ratones, el peso fetal se redujo en un 5% por la exposición al SO₂ y la osificación occipital y de las esterneras se retrasó, pero la incidencia de malformaciones no aumentó significativamente. En conejos, la incidencia de algunas variantes esqueléticas menores aumentó significativamente en el grupo expuesto al SO₂. La exposición de ratones al SO₂, aumentó la frecuencia de aberraciones cromosómicas, es decir, de mutaciones en las que se producen cambios en el número de cromosomas o en su estructura en la médula ósea de una manera proporcional a la dosis, así como aumentos significativos en el daño al ADN de manera dependiente de la dosis de exposición (HSBD, 2023).

En las plantas, el SO₂ puede reducir la fotosíntesis al alterar la función de los tilacoides, interferir con la cadena de transporte de electrones y la permeabilidad de la membrana, destruir pigmentos y afectar la asignación de carbono, lo que provoca daños en las hojas (por ejemplo; manchas amarillas, decoloración y necrosis), así como también inhibir el crecimiento e incluso ocasionar la muerte de los vegetales (Lee *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2021; Li y Yi, 2022).

Se han realizado diversos estudios para evidenciar el impacto de la exposición al SO₂ en los cultivos agrícolas encontrando que pueden ocurrir efectos crónicos en ausencia de síntomas visibles (Ashmore, 1991). Las lesiones crónicas tienden a provocar cambios fisiológicos sutiles, como reducción del crecimiento y/o rendimiento de las plantas, senescencia (envejecimiento biológico) y abscisión (pérdida programada de hojas, flores y frutos) prematuras, maduración acelerada de los frutos y también pueden dar lugar a lesiones cloróticas visibles (Hewitt *et al.*, 1990). Además, los cambios fisiológicos, químicos y anatómicos causados por exposiciones prolongadas a bajos niveles pueden aumentar la susceptibilidad de las plantas a otros estreses bióticos y abióticos, como heladas, sequías y ataques de patógenos.

En términos del impacto negativo sobre los materiales, la contaminación atmosférica es una de las principales causas del deterioro de diversos materiales de construcción de los edificios y estructuras, así como también estatuas y esculturas irremplazables que forman parte del patrimonio cultural, especialmente en las zonas con mala calidad del aire. Se ha analizado el mecanismo de sulfatación de piedra caliza y mármoles por efecto del SO₂, encontrando que el deterioro en esculturas y monumentos históricos se ha acelerado durante los últimos 20 a 25 años debido a la intensa industrialización en el área de Atenas (Brimblecombe, 2004).

Diversos experimentos han demostrado que la corrosión de los metales en zonas urbanas, debido a la presencia de partículas de azufre, es cuatro veces más rápida que en ambientes con aire sin partículas de azufre. El aumento en las concentraciones de dióxido de azufre acelera la corrosión de los metales, a través de la formación de ácidos (H₂SO₃ y H₂SO₄) presentes en la lluvia ácida, de la cual el SO₂ es un importante precursor, como se había mencionado anteriormente (Preradović *et al.*, 2011).

El ácido sulfuroso que se forma al combinarse el dióxido de azufre del aire con el agua de lluvia reacciona con los compuestos de cal del concreto, formando sulfato de calcio. El sulfato de calcio es sólo ligeramente soluble en agua y se deposita sobre o cerca de la superficie, formando una piel, posteriormente, el sulfato de calcio cristaliza detrás de esta piel, y los movimientos diferenciales entre ella y el concreto debajo aflojan el concreto y causan su desintegración (Demirbaş, Öztürk y Karataş, 2001).

2.6 Daños a la salud

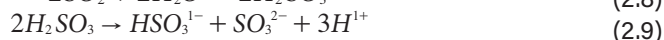
Los efectos a la salud que provoca el SO_2 , dependen de su concentración en el ambiente, del tiempo de exposición de la población y de la susceptibilidad de los individuos, en especial con alguna comorbilidad como por ejemplo asma y enfermedad pulmonar obstructiva crónica. El grado de exposición se asocia también a la tasa de inhalación de los individuos, considerando factores como la edad y la actividad física que desarrollen. En la Tabla 2.4 se clasifican los efectos en la salud según los umbrales de exposición al SO_2 .

Tabla 2.4 Efectos en la salud según los umbrales de exposición al SO_2 (adaptado de HSD, 2023).

Concentración SO_2	Tiempo de exposición	Efecto en la salud
3 – 5 ppm	< 1 min	Olor y sabor detectable
8 – 12 ppm	< 1 h	Irritación de garganta y conjuntiva, lagrimeo
> 10 ppm	< 1 h	Sensación de asfixia, estornudos, tos y aumento de la secreción mucosa
> 50 ppm	< 1 h	Síntomas anteriores con magnitud severa
400 ppm	1 min	Exposición humana letal mínima
SO_2 Líquido	Inmediato	Heridas severas en los ojos

La absorción del SO_2 es alrededor del 85% al ser inhalado a una concentración de 4 a 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Xiaochuan Pan, 2019). El dióxido de azufre es muy soluble en las superficies acuosas de las vías respiratorias, se ha demostrado en cultivos de células ciliadas que hay una reducción del pH extracelular provocando algunas alteraciones (Di Sano *et al.*, 2013). El SO_2 se absorbe rápidamente en la nasofaringe al igual que las partículas finas y ultrafinas ricas en sulfato de amonio ácido, que pueden ser transportadas hacia las vías respiratorias distales y los alvéolos llegando al torrente sanguíneo en donde se distribuyen en el organismo por lo que se han encontrado en pulmones, hígado, bazo, ganglios linfáticos hiliares y riñones (ATSDR, 1998).

Con la hidratación del SO_2 en las mucosas, se produce ácido sulfuroso (H_2SO_3) (Ecuación 2.8) y éste a su vez se disocia en los aniones sulfito (SO_3^{2-}) y bisulfito (HSO_3^-), así como iones H^+ (Ecuación 2.9). El HSO_3^- y el SO_3^{2-} son nucleófilos fuertes y pueden oxidarse en el plasma formando S-sulfonatos (Reno *et al.*, 2015). El H^+ puede reducir el valor del pH de las células y afectar las actividades de las enzimas e interferir con el metabolismo celular (Huang *et al.*, 2021).



Además, el SO_2 puede inducir la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS) al oxidar el sulfito en sulfato y/o activar la NADPH oxidasa (NOX), lo que a su vez causa daño a la biomembrana, desintegración de proteínas, daño al ADN, aberración cromosómica, mutación genética, destrucción del aparato de Golgi y muerte celular programada (PCD) (Okpodu *et al.*, 1996).

Con base en las reacciones químicas del SO_2 en el organismo descritas anteriormente, los principales efectos asociados a la exposición al SO_2 son:

- Dificultad para respirar.
La exposición a corto plazo a SO_2 puede dañar el sistema respiratorio humano y dificultar la respiración, las personas con asma, especialmente los niños son los más sensibles. Se han encontrado asociaciones entre la exposición media diaria a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 y las admisiones hospitalarias por asma y con la mortalidad respiratoria. La revisión sistemática de Zheng *et al.*, (2021) sobre la exposición a SO_2 y las visitas a urgencias reportó un efecto estimado meta-analítico de $\text{RR} = 1.01$ (95% IC: 1.001-1.02) por cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 asumiendo una relación lineal (WHO, 2021).
- Inflamación de las vías respiratorias.
Los derivados del SO_2 (sulfito y bisulfito) pueden inducir una sobreproducción de moco y respuestas inflamatorias en las células epiteliales bronquiales humanas (Li y Meng, 2007).
- Irritación ocular por formación de ácido sulfuroso sobre las mucosas húmedas.
La exposición aguda al vapor de dióxido de azufre o de algún escape de gas comprimido produce efectos irritantes provocando conjuntivitis y quemaduras de la córnea, puede causar opacamiento de la córnea (queratitis). Exposiciones de 10 a 20 ppm causan irritación a las membranas mucosas (ATSDR, 1998; Alvarado Z. X., 2006).
- Alteraciones neurológicas.
Se ha demostrado que el dióxido de azufre (SO_2) endógeno está implicado en las convulsiones y en la apoptosis neuronal relacionada (Niu *et al.*, 2018).
- Edema pulmonar.
Altas concentraciones de SO_2 pueden causar inflamación e irritación del sistema respiratorio, especialmente durante la actividad física intensa, que afectan la función pulmonar y empeoran los ataques de asma (Xiaochuan Pan, 2019; NPS, Gov. USA., 2023).

- Alteraciones al sistema cardiovascular.
El SO₂ está relacionado con el incremento en el número de hospitalizaciones y de muertes por infarto agudo al miocardio y enfermedad isquémica del corazón, entre otras (NOM-022-SSA1-2019).
- Efectos genéticos.
Se ha reportado que la contaminación por SO₂, incluso a concentraciones bajas, tiene un riesgo potencial para el material genético (ADN) de las células de los animales mamíferos. En un estudio realizado en ratas se mostró que el SO₂ podría cambiar la expresión de genes relacionados con la apoptosis e inducir apoptosis en el hígado y propiciar enfermedades asociadas (Xiaochuan Pan, 2019).

2.7 Normatividad

Las regulaciones internacionales en materia de contaminación del aire han sido influenciadas fuertemente por diversos episodios de contaminación a lo largo de la historia, muchos de estos eventos atrajeron la atención científica para estudiar este problema. El primer tratado sobre contaminación atmosférica: "Fumifugium", o "La inconveniencia del aire y del humo diseminado de Londres" fue escrito por John Evelyn en 1661, pero fue hasta octubre de 1952 en Londres donde un evento fue el detonante principal para impulsar la regulación en materia de calidad del aire. Un sistema de alta presión ocasionó que el humo de carbón se acumulara bajo una inversión térmica a lo largo de 5 días, ocasionando que mucha gente desarrollara enfermedades respiratorias en tan solo 12 horas llevando al límite a los servicios de emergencias; una semana después el Ministerio de Salud hizo un estimado de 4,703 víctimas mortales. El Parlamento presionó para que el episodio de niebla se tomara en serio y el gobierno se vio obligado a formar el Comité Beaver, cuyo informe allanó el camino para la Ley de Aire Limpio de 1956 (Brimblecombe, 2011).

En México, en la década de los años setenta se realizaron los primeros intentos para aplicar criterios internacionales para el análisis y regulación de contaminantes del aire y se instalaron las primeras estaciones para el monitoreo de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. El primer contaminante medido fue el dióxido de azufre por el método de pararrosanilina en conjunto con las partículas suspendidas totales (SEDUE, 1987). Se inicia así la historia de la gestión ambiental cuando se presenta el primer Programa Coordinado para Mejorar la Calidad del Aire del Valle de México 1979-1982. Para la década de los noventa se inicia formalmente el monitoreo de la calidad del aire y se crea el Programa Integral para el Control de la Contaminación Atmosférica 1990-1994 (Edomex, 2023). En 1994, entran en vigor las primeras Normas de Calidad del Aire con los criterios para evaluar la calidad del aire ambiente.

La normatividad ambiental mexicana encuentra su base en la Constitución Política. De ésta se derivan las diversas leyes, reglamentos y normas que rigen el país.

Las Normas Oficiales Mexicanas, NOMs, son el instrumento jurídico que obliga a cumplir las especificaciones que determina la autoridad federal. En materia de calidad del aire, la normatividad está determinada particularmente por la Secretaría de Salud, y por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. La Secretaría de Salud establece los criterios para evaluar la calidad del aire respecto a los contaminantes criterio a través de los valores normados para las concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente. La SEMARNAT establece los métodos de medición para determinar la concentración de contaminantes criterio en el aire ambiente y los procedimientos de calibración de los equipos de medición (INE, 2010).

En el caso del dióxido de azufre, la primera norma fue la NOM-022-SSA1-1993, la cual ha tenido dos actualizaciones en 2010 y 2019 como se muestra en la Tabla 2.5, también se presenta un comparativo con dos estándares internacionales más recientes, el Estándar Nacional de Calidad del Aire Ambiente (NAAQ) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA) para SO₂ cuya última revisión fue en 2019 y la Guía de Calidad del Aire de la OMS para SO₂ con última revisión en 2021.

Tabla 2.5 Evolución de las NOM criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂) y comparativo con las normas internacionales (DOF, 2023; US-EPA, 2023; WHO, 2021).

Límite	NOM-022-SSA1-1993	NOM-022-SSA1-2010	NOM-022-SSA1-2019	NAAQs US-EPA SO ₂ 2019 (sin cambios desde 2010)	Guía de Calidad del Aire OMS SO ₂ 2021
24 h	0.13 ppm 341 µg/m ³	0.11 ppm 288 µg/m ³	0.04 ppm** 104.8 µg/m ³		40 µg/m ³ (0.015 ppm)
Anual	0.03 ppm 79 µg/m ³	0.025 ppm 66 µg/m ³			
1 h			0.075 ppm* 196.5 µg/m ³	0.075 ppm**	

* Promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales, obtenidos de los máximos diarios.

** Máximo de 3 años consecutivos, obtenidos de los promedios de 24 horas.

Como es posible observar, a lo largo del tiempo, en las actualizaciones de la NOM de SO₂ se ha reducido gradualmente el límite de exposición ambiental en aras de pre-

venir los efectos de la exposición al SO_2 , esto con base en la mayor disponibilidad de evidencia toxicológica y epidemiológica. Actualmente el límite de exposición en México de 1h está a la par del de la US-EPA pero muy por encima del límite recomendado por la OMS para el promedio de 24h (Tabla 2.5). Esto es debido a que en los últimos años las concentraciones de SO_2 en México no han rebasado significativamente, ni con tanta frecuencia el límite de la norma mexicana (INECC, 2020), sin embargo, por sus efectos en salud, incluso a bajas concentraciones, es necesario mantener una constante vigilancia de su comportamiento en la atmósfera. Los límites manejados por la US-EPA suelen ser más elevados que los implementados en otros países ya que están evaluados como una guía general, en Estados Unidos cada ciudad implementa sus normas locales dado que el comportamiento de los contaminantes depende de las situaciones geográficas y climatológicas locales, es decir los límites que consideran dependen de las situaciones de cada zona aunado a sus actividades.

En términos de los límites de emisión vehicular, el SO_2 no está regulado, debido a las limitaciones del método de medición en los escapes de los vehículos. Aunque cabe mencionar que la concentración de azufre en los combustibles fósiles distribuidos en territorio nacional sí está regulado como se estipula en la NOM-016-CRE-2016 (Especificaciones de calidad de los petrolíferos, con el fin de mitigar las emisiones a la atmósfera de SO_2). En la Tabla 2.6 se describen los límites de azufre total para cada tipo de combustible.

Tabla 2.6 Límites de contenido de Azufre en combustibles fósiles (NOM-016-CRE-2016).

	Gasolina	Diésel vehicular	Turbosina	Diésel industrial	Gasóleo doméstico	Combustóleo	Gas LP
Azufre total	30 mg/kg	15 mg/kg	3,000 mg/kg	0.5% masa	0.05% masa	4.4% masa	140 ppm (en peso)

Con respecto a la normatividad en materia de las emisiones a la atmósfera de SO_2 para el control de óxidos de azufre en fuentes fijas, existen diversas normas aplicables para fuentes puntuales y procesos específicos como se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Normatividad en materia de emisiones atmosféricas de compuestos de azufre aplicables a las fuentes fijas (DOF, 2023).

NOM	Aplicación
NOM-039-SEMARNAT-1993	Bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en plantas productoras de ácido sulfúrico.
NOM-046-SEMARNAT-1993	Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido de azufre, neblinas de trióxido de azufre y ácido sulfúrico, provenientes de procesos de producción de ácido dodecibencensulfónico de fuentes fijas
NOM-085-SEMARNAT-2011	Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición

NOM	Aplicación
NOM-105-SEMARNAT-1996	Partículas sólidas totales y compuestos de azufre reducido total en plantas de fabricación de celulosa.
NOM-137-SEMARNAT-2013	Contaminación atmosférica.- Complejos procesadores de gas.- Control de emisiones de compuestos de azufre
NOM-148-SEMARNAT-2006	Contaminación atmosférica.- Recuperación de azufre proveniente de los procesos de refinación del petróleo.

El organismo público encargado de realizar la observancia de la aplicación y cumplimiento efectivo de la legislación ambiental federal vigente a través de la de inspección, verificación, vigilancia de la actividad industrial es la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), el cual es un órgano administrativo desconcentrado de la SEMARNAT.

2.8 Monitoreo y detección del SO₂

La historia del monitoreo atmosférico en México comienza en la década de 1970 con la instalación de las primeras estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, las cuales monitoreaban PST y SO₂ (SEDUE, 1987). A través de los años, las técnicas de medición de los contaminantes criterio han venido evolucionando de manera rápida y considerable, dichas técnicas están basadas en las propiedades físico químicas de cada contaminante, así como también en el costo beneficio de medir un contaminante a través de un método específico, siendo el método automático el más práctico y con mejor costo-beneficio. Los avances electrónicos han permitido reducciones considerables y mejor funcionamiento en los componentes internos de los analizadores automáticos, asimismo han permitido desarrollar nuevas tecnologías inteligentes, las cuales, en conjunto con las tecnologías de información, están orientadas a lograr la interoperabilidad entre varios equipos y/o sensores que permiten tener los datos de la contaminación de manera más rápida y exacta posible, cercana a tiempo real.

En el monitoreo de los contaminantes criterio se utilizan diversas marcas y modelos de analizadores automáticos, estos deben cumplir con las características requeridas para un método de referencia o método equivalente emitido por la US-EPA así como con las Normas Oficiales Mexicanas para la medición de cada contaminante. Particularmente, para la medición de dióxido de azufre, el Método de la US-EPA es el Método Equivalente Federal (FEM): Fluorescencia UV (Gilliam y Hall, 2016) y la norma mexicana es la NOM-038-SEMARNAT-1993 que establece los métodos de medición para determinar la concentración de dióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. La Figura 2.5 muestra algunos ejemplos de analizadores automáticos de SO₂ así como el interior de uno de éstos.



Figura 2.5 Diferentes marcas de analizadores automáticos de SO_2 e interior de un analizador (Fotografía: R. Castañeda).

2.8.1 Principios de medición

El monitoreo comienza con la entrada del aire ambiente a la toma de muestra en la parte superior de la caseta de monitoreo (Figura 2.6a), el aire ambiente es succionado a través de una bomba de flujo laminar que lo conduce al manifold de muestreo, el cual es un tubo de vidrio con múltiples salidas derivadas a cada uno de los analizadores (Figura 2.6b).

El analizador cuenta con una bomba que succiona la muestra de aire ambiente proveniente del manifold y lo conduce a la cámara de muestra, aquí la muestra de aire ambiente es expuesta a luz ultravioleta con una longitud de onda de 214 nm, la longitud de onda es limitada a través de un filtro paso banda posterior a la fuente de UV. Las moléculas de SO_2 de la muestra son golpeadas por fotones de luz UV y absorben algo de la energía de la luz UV, causando que uno de los electrones de la molécula de SO_2 se mueva a un orbital de mayor energía, esto ocasiona que las moléculas de SO_2 cambien a un estado inestable de excitación, SO_2^* (Ecuación 2.10) (Teledyne API, 2018).



Con base en el principio de conservación de la energía, el sistema buscará el estado de energía estable más bajo disponible, por lo que la molécula de SO_2^* regresa rápidamente a su estado fundamental, el electrón emigrado volverá a su orbital original,

emitiendo el exceso de energía en forma de fotón ($h\nu$), éste fenómeno se conoce como fluorescencia. La longitud de onda de esta luz fluorescente tiene una longitud de onda más larga (de menor energía) centrada en 330 nm (Ecuación 2.11).



La cantidad de luz UV producto de la fluorescencia ($h\nu_{330nm}$) es proporcional a la cantidad de moléculas irradiadas de SO_2 , pero es muy pequeña por lo que es conducida a un dispositivo muy sensible para ser detectada con suficiente resolución para que sea significativa. Este dispositivo es un Tubo Foto Multiplicador (PMT) que es un tubo al vacío que contiene una variedad de electrodos especialmente diseñados. Los fotones de la $h\nu_{330nm}$ ingresan al PMT y golpean un fotocátodo cargado negativamente, lo que hace que emita electrones. Estos electrones son acelerados por un alto voltaje aplicado a través de una serie de electrodos especiales llamados dinodos, los cuales multiplican la cantidad de electrones hasta que se genera una señal de corriente utilizable que se convierte en una señal análoga, la cual es usada por un microprocesador, en conjunto con la información del sensor de flujo másico, para calcular la concentración final de SO_2 (Teledyne API, 2018).

Dependiendo del fabricante del equipo y la aplicación específica que se busca para la medición, algunos valores pueden ser ligeramente diferentes, pero la gran mayoría incluye estos principios para obtener valores en tiempo real de la concentración ambiental de este contaminante y en todos los casos los tiempos de respuesta son cortos, hasta llegar a mediciones cada 20 segundos o menos.



Figura 2.6a Toma de muestra en el techo de la estación.
2.6b Manifold aislado para evitar condensación
(Fotografía: R. Castañeda).

2.8.1.1 Interferencias en la medición

La fuente más común de interferencia proviene de otros gases que emiten fluorescencia de manera similar al SO_2 cuando se exponen a la luz ultravioleta. Ejemplo de estos son el xileno y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) como el naftaleno. Asimismo, el óxido de nitrógeno emite fluorescencia en un rango espectral cercano al SO_2 . Para sortear estas interferencias los analizadores están equipados con un mecanismo depurador especial (Kicker) el cual elimina los hidrocarburos presentes en la muestra de aire ambiente a través de una membrana plástica que absorbe muy bien los hidrocarburos antes de que lleguen a la cámara de muestra. En términos de fluorescencia interferente, la longitud de onda exacta de la luz UV necesaria para excitar un gas fluorescente específico distinto del SO_2 , es eliminado por el filtro óptico UV de la fuente, asimismo, la luz emitida por el óxido de nitrógeno y muchos de los otros gases fluorescentes está fuera del ancho de banda que pasa por el filtro óptico del PMT (Teledyne API, 2018).

2.8.1.2 Mantenimiento y calibración

A pesar de que la operación de las diferentes marcas y modelos de analizadores automáticos de SO_2 está fundamentada en los mismos principios fisicoquímicos, existen ciertas particularidades en la operación y mantenimiento para marca y modelo, específicamente en el tipo, cantidad y periodicidad de elementos que deben ser reemplazados tras el agotamiento de su vida útil, denominados consumibles, al igual que las partes del equipo que sufrieron alguna descompostura y tienen que ser reemplazados, refacciones. El consumo de ambos influye ampliamente en el costo beneficio de un equipo.

Referente a la calibración de los equipos, regularmente se debe contar con tres elementos indispensables:

- Calibrador dinámico de dilución de gases.
Es el encargado de generar las concentraciones que se ingresan a los equipos para probar su capacidad de respuesta y exactitud en su medición, con el fin de calibrar el equipo contra valores estandarizados. Consiste en un conjunto de controladores de flujo másico que diluyen el estándar gaseoso con aire cero (aire limpio) en la proporción que el operador indique.
- Generador de Aire Cero.
Encargado de proveer gas completamente libre de contaminantes al calibrador dinámico. Consiste en un compresor y una serie de filtros para purificar el aire ambiente.
- Cilindro de gas estándar.
Es una mezcla gaseosa a una concentración estandarizada de SO_2 bajo protocolo EPA.

El operador conecta el aire cero y el cilindro de estándar al dilutor y a su vez la salida de éste al inlet del analizador de SO_2 . El analizador se pone en modo de calibración y

el usuario ordena al instrumento que realice lecturas de gases de muestra con concentraciones conocidas de SO₂ a la par que va programando el dilutor para entregar cada concentración deseada. Las lecturas tomadas se ajustan, se linealizan y comparan con los valores esperados como entrada. Con esta información, el software calcula valores tanto para la pendiente como para la ordenada al origen y almacena estos valores en la memoria para posteriormente usarlos en el cálculo de la concentración de SO₂ del gas de muestra.

2.9 Niveles de SO₂ en México y el mundo

Con base en los últimos tres Informes Nacionales de Calidad del Aire (INECC, 2018; INECC, 2019; INECC, 2020) las ciudades mexicanas con mayores concentraciones ambientales de SO₂ son: Salamanca Gto., Irapuato Gto., la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), el Área Metropolitana de Monterrey, Tepeji del Río Hgo., Tula Hgo., Atotonilco Hgo., Tabasco Centro y Atitalaquia Hgo. En la Figura 2.7 se presentan las concentraciones promedio de 24h de SO₂ para estas ciudades durante 2018-2020 y la referencia del límite de exposición normado de 24h de 0.04 ppm estipulado en la NOM-022-SSA1-2019.

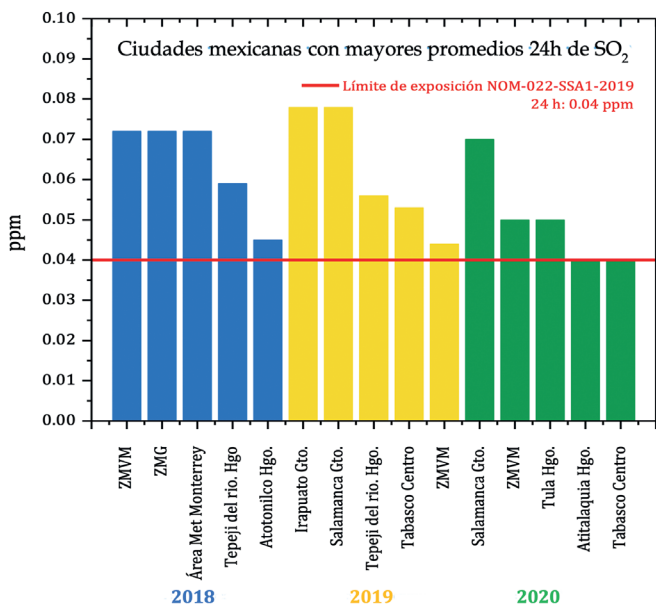


Figura 2.7 Concentraciones promedio de 24h de las ciudades mexicanas con mayores niveles de SO₂ durante 2018-2020 (adaptado de INECC, 2018; 2019 y 2020).

La mayoría de estas ciudades presentan altos niveles de SO₂ ya que albergan o están cercanas a refinerías e industrias petroquímicas. En el caso de la ZMVM aunque no hay industria del petróleo dentro de su territorio, se ve influenciada por la emisiones provenientes del corredor industrial de Tula, ubicado al norte y viento arriba de la Ciudad de México (Sosa *et al.*, 2020), asimismo, las emisiones de SO₂ provenientes de fuentes móviles con uso de diésel también son considerables. Asimismo, es posible observar en 2020 el efecto de la reducción de actividades económicas ocasionado por la pandemia de COVID-19, ya que las concentraciones para este año son menores que las de 2018 y 2019.

Con el fin de realizar un comparativo internacional, se eligió a la ciudad de Salamanca Guanajuato, que presenta las mayores concentraciones de SO₂ en México, y se consultó el promedio anual en el Informe Estatal de Calidad del Aire de Guanajuato 2020; el comparativo se realizó con algunas de las ciudades que presentan las mayores emisiones globales de SO₂ como se mostró en la Figura 2.4, el resultado de este comparativo se resume en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Comparativo internacional de promedios anuales de SO₂ (ppb).

Salamanca, Gto 2020 (SMAOT, 2020)	Norte de China 2020 (Xu <i>et al.</i> , 2023)	Delhi, India 2020 (Dutta y Jinsart, 2020)	Lahore, Pakistán 2020 (Malhi <i>et al.</i> , 2023)
9.92 ppb	5.80 ppb	21.38 ppb	8.99 ppb

Los altos niveles de SO₂ en Delhi están relacionados principalmente con la quema de carbón en plantas de generación de energía (Sindhvani *et al.*, 2015) y como se observa, es la ciudad con las mayores concentraciones de SO₂, más del doble con respecto a Salamanca. Las fuentes de emisión principales de SO₂ en Salamanca son las industrias petroquímicas y las plantas de generación de energía a base combustibles fósiles (Violante *et al.*, 2022). El promedio anual de SO₂ de Salamanca es ligeramente más alto que el de Lahore, Pakistán, en donde las principales fuentes de emisión de SO₂ son las actividades industriales y las emisiones de centrales termoeléctricas (Rana y Siddiqui, 2023). China ha hecho un gran esfuerzo para disminuir sus niveles de contaminación del aire durante los últimos 10 años, con base en esto, la región del Norte de China presenta la menor concentración promedio anual de SO₂ del comparativo, casi un 40% del nivel de Salamanca, en el Norte de China las emisiones de SO₂ provienen principalmente del gran número de minas de carbón así como también por la quema de carbón por parte de la población para calentar sus hogares (Xu *et al.*, 2023).

2.10 Reflexiones y conclusiones

Como se detalló a lo largo de este capítulo, las propiedades fisicoquímicas de la molécula de SO₂ influyen totalmente en las condiciones en que este contaminante cri-

terio es emitido a la atmósfera, en sus diversas fuentes de emisión, en la forma en que reacciona en la atmósfera, en sus impactos en la salud y en el ambiente, así como en las técnicas de su medición.

Es una molécula con tal reactividad que los mecanismos de reacción en atmósfera no han sido totalmente demostrados, sino más bien teorizados. Por lo que existe un área de oportunidad considerable para continuar con la investigación de los procesos fotoquímicos que acontecen en la atmósfera en relación al SO₂, haciendo uso de los grandes avances actuales en materia de modelado e inteligencia artificial, y no sólo para demostrar los mecanismos de reacción del SO₂ sino también para desarrollar estrategias de mitigación a los graves problemas de calentamiento global y cambio climático a través de proyectos de geoingeniería. Hay mucho que también puede hacerse en materia de la desulfuración de los combustibles fósiles para evitar de raíz la emisión de SO₂ a la atmósfera.

En términos de toxicología del SO₂, aún hay mucho camino que recorrer para demostrar todos los efectos en la salud de los seres vivos asociados a la exposición a este contaminante. Las reacciones químicas del SO₂ y sus subproductos en los diversos sistemas biológicos son tan extensas y pueden seguir un enorme número de rutas, por lo que la investigación toxicológica es fundamental y va de la mano con la normatividad nacional e internacional en aras salvaguardar la salud pública. Los ensayos toxicológicos están evolucionando para disminuir el uso controversial de ensayos in vivo en animales, hacia los ensayos in vitro en cultivos celulares y ahora más allá incluso se habla de los ensayos in silico, que consisten en simulaciones computacionales, las cuales son particularmente atractivas, porque son extremadamente rápidas y rentables, así que hay mucho que podría explorarse por esta vía para continuar detallando la toxicología del SO₂.

Para disminuir el impacto del SO₂ en la salud y en el ambiente, se debe trabajar en las regulaciones internacionales y nacionales así como mejorar la vigilancia ambiental, y para regular se requiere medir, entre más puntos de medición haya, se puede hacer un análisis más representativo, pero para incrementar la cobertura de medición es importante continuar con la investigación necesaria para desarrollar y mejorar la eficiencia de los equipos de medición para que estos tengan una operación más práctica y a menor costo. El desarrollo de estas nuevas tecnologías de medición depende totalmente del mejor entendimiento de la química del dióxido de azufre.

Referencias

1. Alvarado Z. (2006) Impacto en la salud ambiental por efecto de emisiones de dióxido de azufre del volcán arenal, en la población de La Fortuna de San Carlos. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 29:25-34. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1409-14292006000200004&script=sci_arttext
2. Arellano Arellano, S. R. (2005) Estudio e implementación de un sistema de medición remota continua de flujo de gas SO₂ de origen volcánico basado en espectroscopía óptica diferencial de absorción [Tesis de Licenciatura, Escue-

- la Politécnica Nacional, Ecuador]. <https://www.fundaciongarciasineriz.es/wp-content/uploads/attachments/SArellano.pdf>
3. Ashmore, M. (1991). Air pollution and agriculture. *Outlook on Agriculture*, 20(3), 139-144. <https://doi.org/10.1177/003072709102000303>
 4. ATSDR, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (1998). *Toxicological profile for sulfur dioxide*. <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp116.pdf>
 5. Bajia, S. C., Singh, R. J., Bajia, B., y Kumar, S. (2017). Determination of sulfur content in petroleum products—an overview. *Journal of Sulfur Chemistry*, 38(4), 450-464. Chemistry, 38:4, 450-464. DOI: 10.1080/17415993.2017.1289530
 6. Brimblecombe, P. (2004). Damage to cultural heritage. En Sainz-Jiménez (Ed), *Air Pollution and Cultural Heritage*. (pp. 87-90). London. Taylor & Francis Group.
 7. Brimblecombe, P. (2011). Air Pollution Episodes. *Encyclopedia of Environmental Health*, 39–45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00058-1>
 8. De Hoog, J. C. M., Hattori, K. H., y Hoblitt, R. P. (2004). Oxidized sulfur-rich mafic magma at Mount Pinatubo, Philippines. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146, 750-761. <https://doi.org/10.1007/s00410-003-0532-4>
 9. Demirbaş, A., Öztürk, T., y Karataş, F. Ö. (2001). Long-term wear on outside walls of buildings by sulfur dioxide corrosion. *Cement and concrete research*, 31(1), 3-6. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00447-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00447-6)
 10. Di Sano, C., Di Vincenzo, S., Lo Piparo, D., D'Anna, C., Taverna, S., Lazzara, S., Pinto, P., Sortino, F. y Pace, E. (2023). Effects of condensates from volcanic fumaroles and cigarette smoke extracts on airway epithelial cells. *Human Cell*, 36:1689–1702. <https://doi.org/10.1007/s13577-023-00927-1>
 11. DOF, Diario Oficial de la Federación. (1993). NOM-022-SSA1-1993. 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. http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/nom_022_ssa1_1993_so2.pdf
 12. DOF, Diario Oficial de la Federación. (1993). NOM-038-SEMARNAT-1993 Que establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-038-SEMARNAT-1993.pdf>
 13. DOF, Diario Oficial de la Federación. (1993). NOM-039-SEMARNAT-1993. Bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico en plantas productoras de ácido sulfúrico. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1190/1/nom-039-semarnat-1993.pdf>
 14. DOF, Diario Oficial de la Federación. (1993). NOM-046-SEMARNAT-1993. Niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido de azufre, neblinas de trióxido de azufre y ácido sulfúrico, provenientes de procesos de producción de ácido dodecilsulfónico de fuentes fijas. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1195/1/nom-046-semarnat-1993.pdf>

15. DOF, Diario Oficial de la Federación. (1996). NOM-105-SEMARNAT-1996. Partículas sólidas totales y compuestos de azufre reducido total en plantas de fabricación de celulosa. https://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4905610&fecha=15/11/1996#gsc.tab=0
16. DOF, Diario Oficial de la Federación. (2006). NOM-148-SEMARNAT-2006. Contaminación atmosférica.- Recuperación de azufre proveniente de los procesos de refinación del petróleo. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/2924/semarnat1/semarnat1.htm>
17. DOF, Diario Oficial de la Federación. (2010). 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. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5158348&fecha=08/09/2010#gsc.tab=0
18. DOF, Diario Oficial de la Federación. (2011). NOM-085-SEMARNAT-2011. Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4632/semarnat/semarnat.htm>
19. DOF, Diario Oficial de la Federación. (2013). NOM-137-SEMARNAT-2013. Contaminación atmosférica.- Complejos procesadores de gas.- Control de emisiones de compuestos de azufre. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5333283&fecha=20/02/2014
20. DOF, Diario Oficial de la Federación. (2016). NOM-016-CRE-2016 Especificaciones de calidad de los petrolíferos. 29 de Agosto 2016. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016#gsc.tab=0
21. DOF, Diario Oficial de la Federación. (2019). NOM-022-SSA1-2019. 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. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5568395&fecha=20/08/2019#gsc.tab=0
22. Droux, M., Gakière, B., Denis, L., Ravanel, S., Tabe, L., Lappartient, A. G., y Job, D. (2000). Methionine biosynthesis in plants: biochemical and regulatory aspects. *Sulfur Nutrition and Sulfur Assimilation in Higher Plants: Molecular, Biochemical and Physiological Aspects*, 73-92.
23. Dukovic y Bojanic. (2000). Air pollution, idea, condition, sources, control and technological solutions. Banja Luka: Institute of protection and ecology.
24. Dutta, A. y Jinsart, W. (2022). Air pollution in Delhi, India: It's status and association with respiratory diseases. *Plos one*, 17(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274444>
25. Edomex. Gobierno del Estado de México. (2023). Programa para Mejorar la Calidad del Aire, Antecedentes. Disponible en <http://proaire.edomex.gob.mx/antecedentes>

26. Emmett, E. J. y Willis, M. C. (2015). The development and application of sulfur dioxide surrogates in synthetic organic chemistry. *Asian Journal of Organic Chemistry*, 4(7), 602-611. <https://doi.org/10.1002/ajoc.201500103>
27. EST y TSHR Analytica. (2023). ¿Qué es la fluorescencia UV? Disponible en <https://estanalytical.com/what-is-uv-fluorescence/>
28. Gilliam, J. y Hall, E. (2016). *Reference and Equivalent Methods Used to Measure National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) Criteria Air Pollutants*-Volume IUS Environmental Protection Agency, Washington, DC. Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA.
29. Grutter, M., Basaldud, R., Rivera, C., Harig, R., Junkerman, W., Caetano, E. y Delgado-Granados, H. (2008). SO₂ emissions from Popocatepetl volcano: emission rates and plume imaging using optical remote sensing techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(22), 6655-6663. <https://doi.org/10.5194/acp-8-6655-2008>
30. Haynes, W.M. (ed.). (2014). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 95th Edition. Boca Raton: FL. CRC Press LLC.
31. Haz-Map, Information on Hazardous Chemicals and Occupational Diseases. (2023). Sulfur Dioxide. Disponible en <https://haz-map.com/Agents/25>
32. Hewitt, C., Lucas, P., Wellburn, A. R. y Fall, R. (1990). Chemistry of ozone damage to plants. *Chemistry and industry*, (15), 478-481.
33. NIH, National Institutes of Health. (2023). Hazardous Substances Data Bank, Sulfur dioxide. National Library of Medicine. Disponible en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/source/hsdb/228>
34. Huang, Y., Zhang, H., Lv, B., Tang, C., Du, J. y Jin, H. (2021). Endogenous sulfur dioxide is a new gasotransmitter with promising therapeutic potential in cardiovascular system. *Sci Bull (Beijing)*, 66, 1604-1607. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.04.003>
35. INE, Instituto Nacional de Ecología. (2010). *Manual 1 Principios de Medición de la Calidad del Aire*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
36. INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2019). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2018*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2018.pdf>
37. INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2020). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2019*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2019.pdf>
38. INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2021). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2020*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2020.pdf>
39. INSST, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España (2014). Dióxido de Azufre. Disponible en <https://www.insst.es/documents/94886/289651/DLEP+86+DIOXIDO+DE+AZUFRE.pdf/d339b938-aa66-4f09-a056-39c2866676af>
40. Intersam (2022). Tipos de gases refrigerantes y sus características. Disponible en <https://intersam.es/tipos-gases-refrigerantes-caracteristicas/>

41. Shafiq, I., Shafique, S., Akhter, P., Yang, W. y Hussain, M. (2022). Recent developments in alumina supported hydrodesulfurization catalysts for the production of sulfur-free refinery products: A technical review. *Catalysis Reviews*, 64(1), 1-86. <https://doi.org/10.1080/01614940.2020.1780824>
42. Kaufman, Y. J., Tanré, D. y Boucher, O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419(6903), 215-223. <https://doi.org/10.1038/nature01091>
43. Khoder, M. I. (2002). Atmospheric conversion of sulfur dioxide to particulate sulfate and nitrogen dioxide to particulate nitrate and gaseous nitric acid in an urban area. *Chemosphere*, 49(6), 675-684. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00391-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00391-0)
44. Khokhar, M. F., Frankenberg, C., Van Roozendaal, M., Beirle, S., Köhl, S., Richter, A., ... y Wagner, T. (2005). Satellite observations of atmospheric SO₂ from volcanic eruptions during the time-period of 1996–2002. *Advances in Space Research*, 36(5), 879-887. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.04.114>
45. Lee, H. K., Khaine, I., Kwak, M. J., Jang, J. H., Lee, T. Y. y Lee, J. K. (2017). The relationship between SO₂ exposure and plant physiology: a mini review. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 58, 523–529. <https://doi.org/10.1007/s13580-017-0053-0>
46. Lee, W. R., Visioni, D., Bednarz, E. M., MacMartin, D. G., Kravitz, B. y Tilmes, S. (2023). Quantifying the efficiency of stratospheric aerosol geoengineering at different altitudes. *Geophysical Research Letters*, 50(14). <https://doi.org/10.1029/2023GL104417>
47. Li R. y Meng Z. (2007). Effects of SO₂ derivatives on expressions of MUC5AC and IL-13 in human bronchial epithelial cells. *Archives of Toxicology*, 81(12):867–874. <https://doi.org/10.1007/s00204-007-0212-7>
48. Li, L. y Yi, H. (2022). Enhancement of drought tolerance in Arabidopsis plants induced by sulfur dioxide. *Ecotoxicology*. <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02530-w>
49. Malhi, H. M., Ahmed, I., Nasim, I., Khurshid, I., Haider, R., Nawaz, R., ... y Shah, S. I. H. (2023). Monitoring of Ambient Air Pollution in Lahore City. *Pakistan Journal of Emerging Science and Technologies (PJEST)*, 4(3), 1-9. <https://doi.org/10.58619/pjest.v4i3.118>
50. Niu, M., Han, Y., Li, Q., y Zhang, J. (2018). Endogenous sulfur dioxide regulates hippocampal neuron apoptosis in developing epileptic rats and is associated with the PERK signaling pathway. *Neuroscience Letters*, 665, 22-28. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2017.11.036>
51. NPS, National Park Service Government Agency Gov. USA. (2023). Sulfur Dioxide Effects on Health. Disponible en <https://www.nps.gov/subjects/air/human-health-sulfur.htm>
52. Okpodu, C. M., Alscher, R. G., Grabau, E. A. y Cramer, C. L. (1996). Physiological, biochemical and molecular effects of sulfur dioxide. *Journal of Plant Physiology*, 148, 309–316. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80258-6](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80258-6)
53. OSHA, Occupational Safety and Health Administration. (2023). Sulfur Dioxide. Disponible en <https://www.osha.gov/chemicaldata/549>

54. Pattantyus, A. K., Businger, S. y Howell, S. G. (2018). Review of sulfur dioxide to sulfate aerosol chemistry at Kilauea Volcano, Hawai'i. *Atmospheric Environment*, 185, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.055>
55. Preradović, L., Ilić, P., Marković, S. y Janjuš, Z. (2011). Meteorological parameters and pollution caused by Sulfur dioxide and their influence on construction materials and heritage. *Facta universitatis-series: Electronics and Energetics*, 24(1), 9-20. <https://doi.org/10.2298/FUEE1101009P>
56. PubChem. (2023). Sulfur Dioxide. Disponible en <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1119>
57. Q2Technologies. (2023). H2S Removal Technologies in Crude Oil. Disponible en <https://q2technologies.com/new/h2s-removal-technologies-in-crude-oil/>
58. Rana, F. y Siddiqui, S. (2023). Investigating the Spatiotemporal Distributions of NO₂, SO₂ and Their Association with NDVI in Lahore (Pakistan) and Its Adjoining Region of Punjab (India). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01726-9>
59. Reno A.L., Brooks E.G. y Bill T. Ameredes B.T. (2015). Mechanisms of Heightened Airway Sensitivity and Responses to Inhaled so₂ in Asthmatics. *Environmental Health Insights* 9:13–25. <https://doi.org/10.4137/EHI.S15671>.
60. SEDUE. (1987). *Políticas y estrategias de abatimiento y control de la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Metepec, Puebla, México.
61. SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Inventario Nacional de Emisiones 2016*. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/documentos-del-inventario-nacional-de-emisiones>
62. Sindhvani, R., Goyal, P., Kumar, S. y Kumar, A. (2015). Anthropogenic emission inventory of criteria air pollutants of an urban agglomeration-National Capital Region (NCR), Delhi. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(4), 1681-1697. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.11.0271>
63. SMAOT, Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial, Gobierno de Guanajuato (2020). *Informe de estado y tendencia de calidad del aire de Guanajuato*. [https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/calidad-del-aire/1/Sistema-de-Monitoreo-de-la-calidad-del-Aire-del-Estado-de-Guanajuato-\(SIMEG\)](https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/calidad-del-aire/1/Sistema-de-Monitoreo-de-la-calidad-del-Aire-del-Estado-de-Guanajuato-(SIMEG))
64. Smith, S. J., van Aardenne, J., Klimont, Z., Andres, R. J., Volke, A. y Delgado Arias, S. (2011). Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(3), 1101-1116. <https://doi.org/10.5194/acp-11-1101-2011>
65. Sosa E, R., Vega, E., Wellens, A., Jaimes, M., Fuentes G, G., Granados H, E., ... y Mateos D, E. (2020). Reduction of atmospheric emissions due to switching from fuel oil to natural gas at a power plant in a critical area in Central Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 70(10), 1043-1059. <https://doi.org/10.1080/10962247.2020.1808113>
66. Teledyne API. (2018). Operation Manual Model T100 UV Fluorescence SO₂ Analyzer. San Diego, CA. USA. Disponible en https://www.teledyne-ml.com/support/_hardware/Documents/T100.pdf

67. US-EPA, US Environmental Protection Agency. (2023). NAAQS Table. Disponible en <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>
68. US-EPA, US Environmental Protection Agency. (2023a). What is acid rain. Disponible en <https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>
69. Violante Gavira, A. E., Sosa González, W. E., Pali Casanova, R. D. J., Yam Cervantes, M. A., Aguilar Vega, M., Chacha Coto, J., ... y García Villena, E. (2022). Application of the Gaussian Model for Monitoring Scenarios and Estimation of SO₂ Atmospheric Emissions in the Salamanca Area, Bajío, Mexico. *Atmosphere*, 13(6), 874. <https://doi.org/10.3390/atmos13060874>
70. Weil E. D. (2005). Sulfur Compounds. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. NY: John Wiley & Sons.
71. WHO, World Health Organization. (2021). *Air Quality Guidelines - Update 2021*. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/air-pollution-documents/air-quality-and-health/who-air-quality-database-2021_final.pdf?sfvrsn=2371d57c_5
72. Xiaochuan Pan. (2019). Sulfur Oxides: Sources, Exposures and Health Effects. *Encyclopedia of Environmental Health. Second edition*, 2011, 290-296.
73. Xu T, Chen B, Ren Y, Zhao L, Hu J, Wang Y, Song Z y Li X. (2023). Estimation of the ground-level SO₂ concentration in eastern China based on the LightGBM model and Himawari8 TOAR. *Front. Earth Sci.*10, 1-14. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1037719>