

## Lluvia ácida en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

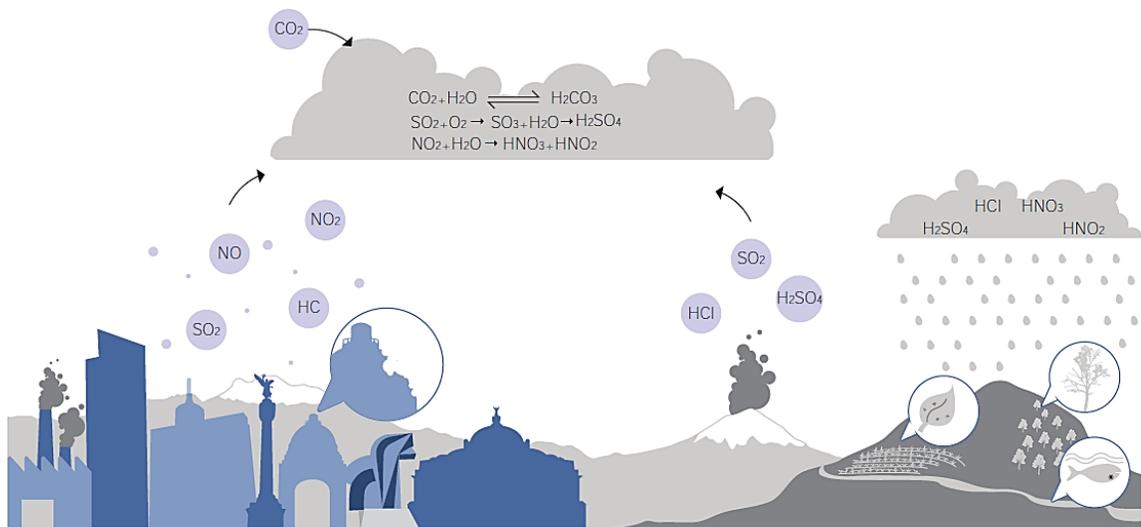
### Red de Depósito Atmosférico

La Red de Depósito Atmosférico (REDDA) se encarga de monitorear la contaminación que desciende de la atmósfera, ya sea en forma de partículas (depósito seco) o contenida en el agua de lluvia, granizo y nieve (depósito húmedo). El monitoreo de la REDDA se lleva a cabo mediante campañas de muestreo semanales en 16 estaciones, realizadas desde 1988 por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT).

La Red de Depósito Atmosférico (REDDA) cumple con varios objetivos esenciales para el monitoreo de la calidad del aire: determinar la variabilidad espacial y temporal de la deposición húmeda y seca en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), evaluar las estrategias de control de emisiones implementadas en la ZMCM, caracterizar el fenómeno de la lluvia ácida en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), y generar información confiable para evaluar el impacto en el bienestar de la población tanto en comunidades del suelo de conservación (daños a la vegetación) como en la infraestructura urbana y patrimonios históricos de la ciudad.

### ¿Qué es la lluvia ácida?

La lluvia ácida es un fenómeno que ocurre cuando el agua de lluvia reacciona con gases contaminantes como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), produciendo ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). Estas reacciones químicas alteran el pH de la lluvia, disminuyéndolo considerablemente por debajo del valor natural de 5.6, que es ligeramente ácido debido a fuentes naturales de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), azufre y óxidos de nitrógeno (Garcés Giraldo & Hernández Ángel, 2004; Domínguez, 2004). Se considera lluvia ácida cuando el pH cae por debajo de 5.6, nivel que es crucial para mantener algunos ciclos geoquímicos en áreas alejadas de emisiones antropogénicas.



**Figura 1.** Formación y efectos de la lluvia ácida. El dióxido de carbono de la atmósfera provoca que el agua de lluvia sea ligeramente ácida, sin embargo, las emisiones volcánicas y los óxidos de nitrógeno y azufre emitidos en la ciudad reaccionan con el agua incrementando el nivel de acidez. La lluvia ácida se deposita lejos de las fuentes de emisión, ocasionando daños a construcciones y monumentos, bosques y cultivos, y a los ecosistemas acuáticos (SEDEMA, 2012).

## ¿De dónde provienen los precursores y cuáles son las consecuencias de la lluvia ácida?

Las actividades antropogénicas, principalmente la quema de combustibles fósiles y las emisiones industriales, contribuyen significativamente a este fenómeno. En la Ciudad de México, el 84% de los  $\text{NO}_x$  provienen de fuentes móviles, especialmente del transporte particular y público de baja y mediana capacidad, como taxis, vagonetas y microbuses. En cuanto a las emisiones de  $\text{SO}_2$ , el 39% provienen de las industrias, seguidas por las fuentes de área con un 32% (SEDEMA, 2021).

La lluvia ácida tiene efectos negativos en la salud humana, la calidad del agua, y la biodiversidad (Garcés Giraldo & Hernández Ángel, 2004). En estudios realizados en la Ciudad de México, se ha determinado que el pH ácido de la lluvia reduce el contenido de clorofila en las especies de árboles más abundantes, *Liquidambar styraciflua* L. y *Fraxinus uhdei* Wenz., causando daño fisiológico y físico en las hojas (Rodríguez-Sánchez et al., 2020). Además, degrada los materiales de construcción en contacto continuo con ella, afectando la infraestructura urbana (Castillo-Miranda & Rodríguez-Gómez, 2022). A largo plazo, la lluvia ácida también afecta los cuerpos de agua; aunque inicialmente puede ser neutralizada por los compuestos básicos en ríos y lagos, con el tiempo, estos compuestos se agotan y el pH disminuye (Chen et al., 2013; Zhang, L. et al., 2024).

## Temporada de lluvia y calidad del aire

Durante la temporada de lluvias, los contaminantes se depositan en las precipitaciones, lo que resulta en una disminución de las concentraciones medidas en el aire. En los estudios sobre el depósito atmosférico húmedo, se distinguen dos procesos: "rainout" o eliminación por lluvia, que ocurre en la troposfera, y "washout" o eliminación por lavado, que se presenta en la capa límite atmosférica. La eliminación por lavado contribuye al depósito atmosférico húmedo en función de la concentración de iones presentes en la capa límite atmosférica. Cuando esta capacidad de carga se supera, las concentraciones de iones serán más altas durante un episodio de lluvia. Este fenómeno es observable en las primeras etapas de los eventos de lluvia, donde se registran mayores concentraciones de iones antes de alcanzar un valor constante o disminuir (Carnelos et al., 2024).

Este efecto se puede ver en los datos de los iones medidos durante la campaña del 2022 de la **Red de Depósito Atmosférico** del Sistema de Monitoreo Atmosférico (**SIMAT**) de la Ciudad de México, en la gráfica de la concentración total de los iones por mes (**Figura 2**). El acumulado mensual más alto de concentración para todos los iones se registró en mayo y disminuyó gradualmente en los meses siguientes para los iones  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . En el caso del  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , se observó un incremento en agosto, lo cual también se reflejó en la concentración de  $\text{H}^+$ .

Por otro lado, en la **Figura 3**, se observa como las concentraciones promedio por contaminante, de acuerdo con las mediciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico del SIMAT, disminuyen durante la temporada de lluvia a partir de mayo,

# Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT)

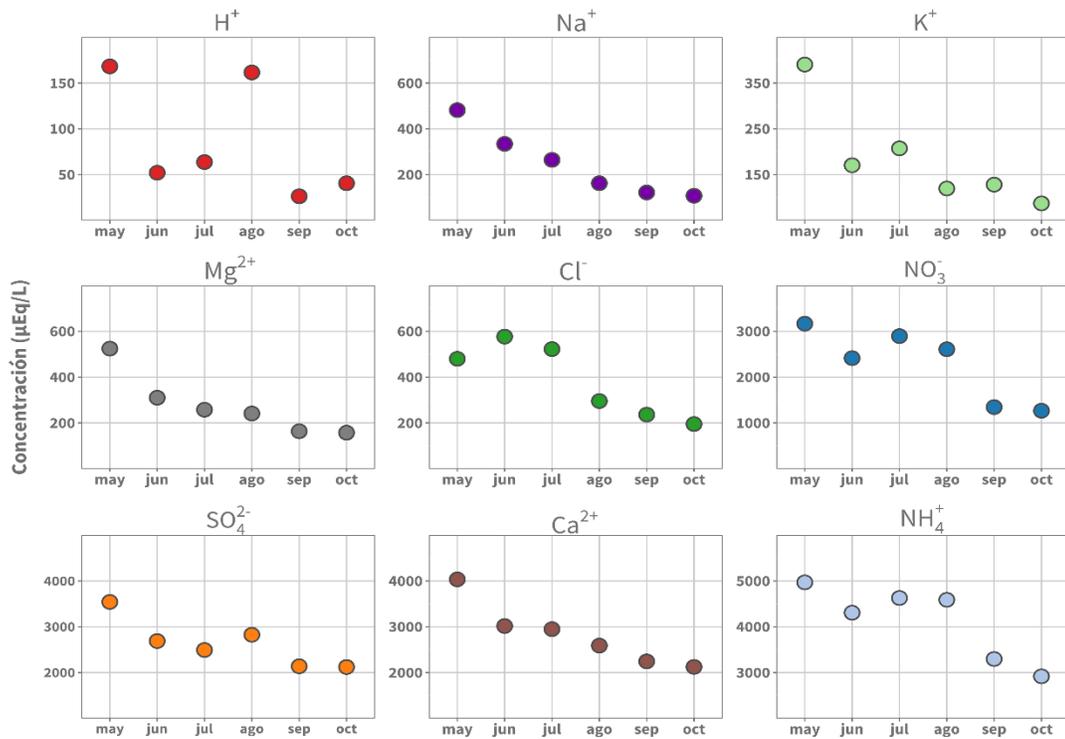


Figura 2. Sumatoria de las concentraciones (µEq/L) de cada uno de los iones por mes.

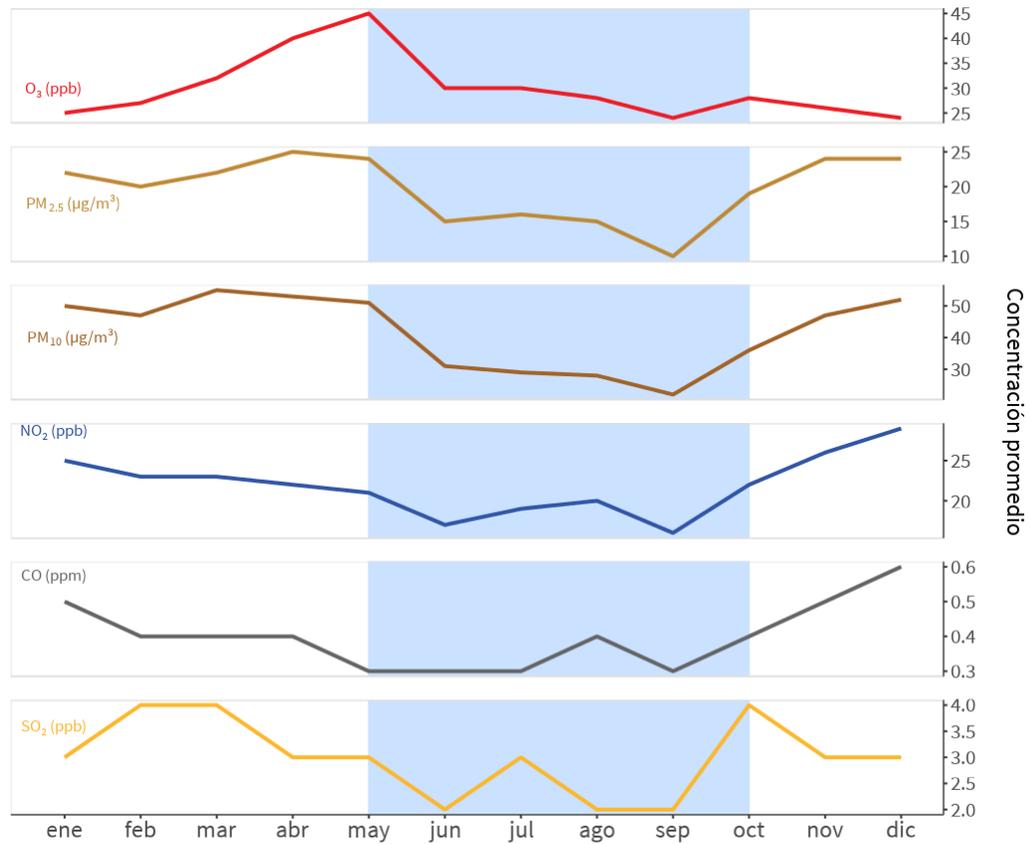


Figura 3. Concentración promedio mensual por contaminante. En el sombreado color azul se señalan los meses de la temporada de lluvias.

Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. 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. Ciudad de México. Agosto, 2021.

Garcés Giraldo, L. F., & Hernández Ángel, M. L. (2004). La lluvia ácida: Un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(2), 67-72. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69510211>

Rodríguez-Sánchez VM, Rosas U, Calva-Vásquez G, Sandoval-Zapotitla E. Does Acid Rain Alter the Leaf Anatomy and Photosynthetic Pigments in Urban Trees? *Plants (Basel)*. 2020 Jul 8;9(7):862. doi: 10.3390/plants9070862. PMID: 32650420; PMCID: PMC7411892.

Castillo-Miranda, J. O., & Rodríguez-Gómez, F. J. (2022). Mapping of the cost of atmospheric corrosion of zinc and galvanised steel due to the effect of atmospheric pollution in the Mexico City Metropolitan Area. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 57(5), 408-419. <https://doi.org/10.1080/1478422x.2022.2074115>

Chen, L., Liu, R.M., Huang, Q. et al. Integrated assessment of nonpoint source pollution of a drinking water reservoir in a typical acid rain region. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 10, 651–664 (2013). <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0242-z>

Zhang, L., Wang, J., Wang, S., Wang, C., Yang, F., Li, T. 2024. Chemical characteristics of long-term acid rain and its impact on lake water chemistry: A case study in Southwest China. *Journal of Environmental Sciences*, Volume 138: 121-131,