



## C A P Í T U L O 6

# Satélites midiendo la calidad del aire desde el espacio

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.198132518076>

**Alma Angélica Neria Hernández**

Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México.

ORCID: 0000-0003-1673-8029

**Francisco Zepeda Mondragón**

Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México.

ORCID: 0000-0003-3297-7580

**Xanat Antonio Némiga**

Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México.

ORCID: 0000-0002-8827-6575

**Resumen:** La medición de la calidad del aire es una necesidad vital para la prevención de los riesgos sanitarios asociados a la exposición a contaminantes atmosféricos que ingresan al sistema respiratorio y alteran el metabolismo celular causando desde reacciones agudas hasta cáncer, lo cual genera cada año millones de muertes en el mundo. La medición de la calidad del aire a través de redes de monitoreo presenta dos grandes problemas: un alcance limitado y un alto costo de instalación y operación, por lo que la medición satelital representa una alternativa de menor costo y de alcance ilimitado. El presente artículo introduce al lector sobre qué son los satélites y sensores y cómo miden la calidad del aire, así como también presenta algunas de las aplicaciones de las imágenes satelitales para el monitoreo de diversas contingencias ambientales e informa al lector sobre los diferentes productos satelitales y dónde pueden ser localizados, descargados y usados, también informa sobre los efectos negativos de la mala calidad del aire en la salud.

**Palabras clave:** Contaminantes atmosféricos, Satélites, PM<sub>2,5</sub>, Profundidad óptica de aerosoles

## Satellites measuring the quality of the air from space

**Abstract:** Air quality measurement is a vital necessity for the prevention of health risks associated with exposure to atmospheric pollutants that enter the respiratory system and alter cellular metabolism, developing from acute reactions to cancer, which causes millions of deaths worldwide each year. Air quality measurement through monitoring networks presents two major problems: limited coverage and a high cost of installation and operation, hence satellite measurement represents a lower-cost alternative with unlimited coverage. This article introduces the reader to what satellites and sensors are and how they measure air quality, as well as presents some of the applications of satellite images for monitoring environmental contingencies and informs the reader about the different satellite products and where they can be located, downloaded and used, and reports on the negative effects of poor air quality on health.

**Keywords:** Air pollution, Satellites, PM<sub>2,5</sub>, Aerosol optical depth

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire está asociada con 6,7 millones de muertes prematuras al año (OMS, 2022). Esto es debido a la presencia en el aire de los contaminantes gaseosos y a las partículas suspendidas denominadas como PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> por su tamaño en unidades de medida increíblemente diminutas (micrómetros); son 20 veces menor que el grosor de un cabello humano. Al ser tan pequeñas, ingresan desde el sistema respiratorio al torrente sanguíneo, alcanzando diferentes órganos y alterando su metabolismo celular. Lo cual causa asma y alergias, infecciones respiratorias, problemas cardiovasculares e incluso cáncer. Vigilar la calidad del aire es fundamental para alertar a la población cuando los niveles de contaminación son muy altos, para que puedan evitar o reducir los impactos negativos a su salud.

La medición de la calidad del aire se realiza principalmente a través de redes de monitoreo que son conjuntos de estaciones distribuidas principalmente en zonas urbanas, equipadas con instrumentos que miden directamente la concentración de los contaminantes a nivel superficial, que entregan mediciones horarias y representativas en un radio de 3 a 20 Km. Pese a ser precisas, estas redes son costosas y de alcance limitado por lo que la calidad del aire en las regiones fuera de su cobertura se desconoce, así como también el riesgo a la salud de estos habitantes. Aquí es donde los satélites son una alternativa de alcance ilimitado y menor costo, ya que circundan nuestro planeta desde el espacio, pudiendo medir globalmente la calidad del aire. Pero ¿Qué son los satélites? ¿Cómo funcionan? ¿Cómo miden la calidad del aire?

## ¿Qué son los satélites y cómo funcionan?

Satélite se refiere a todo cuerpo, artificial o natural, que gira alrededor de otro de mayor masa, atrapado por su atracción gravitatoria (SEA, 2024). Por ejemplo, la Luna es un satélite natural de la Tierra, aunque en el presente contexto nos referiremos a los satélites artificiales, que son máquinas lanzadas al espacio y que se mueven alrededor de la Tierra u otros cuerpos celestes. Son construidos con una función específica (medir alguna variable o transmitir alguna señal). Tienen en común dos elementos: una antena que envía y recibe información y una fuente de poder (paneles solares o baterías); además, tienen instalados cámaras y sensores. Su construcción puede tardar años, pues tienen que soportar el lanzamiento en cohete y las condiciones hostiles del espacio. Orbitan alrededor de la Tierra para equilibrar su velocidad con la fuerza de gravedad terrestre, ya que de lo contrario caerían de nuevo hacia la Tierra o se dirigirían en línea recta hacia el espacio. Sus órbitas pueden seguir diferentes trayectorias, siendo la geoestacionaria y la polar las más comunes. La geoestacionaria circula de Oeste a Este sobre el ecuador a la misma velocidad que la rotación de la Tierra, por lo que dan la impresión de estar estáticos; mientras que la polar se desplaza de Norte a Sur sobre la Tierra en rotación, escaneando el planeta completo en segmentos verticales. Su comunicación es a través de ondas de radio recibidas por antenas terrestres que reciben sus condiciones operativas y su posición, así como los datos que el satélite colectó: números indicando la intensidad de alguna señal con los que se componen imágenes.

Estos satélites son construidos y operados por las agencias espaciales gubernamentales, tales como la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio, NASA por sus siglas en inglés, de Estados Unidos y la Agencia Espacial Europea (ESA), así como por empresas particulares. México cuenta con dos satélites operados por el sector público: Bicentenario y Morelos III que dan servicios al gobierno en materia de seguridad nacional, cobertura social y comunicación, y el sector privado cuenta con satélites geoestacionarios destinados a la comunicación (DOF, 2023).

## ¿Cómo miden los satélites la calidad del aire?

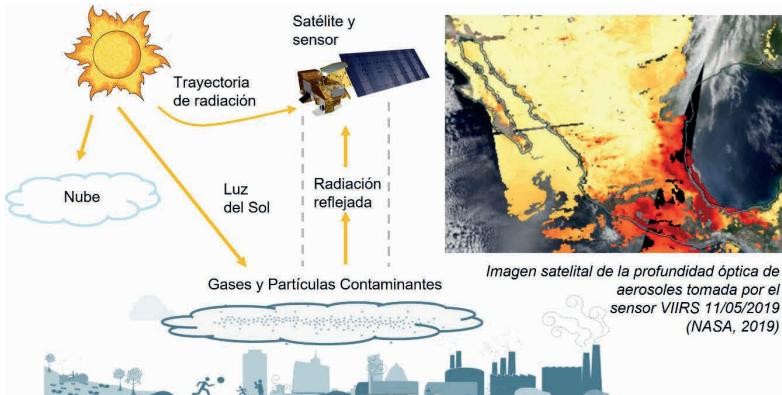


Fig. 1. Monitoreo satelital de la calidad del aire. Fuente:  
Elaboración propia adaptado de Zhang et al (2021)

Las partículas y gases suspendidos en la atmósfera interactúan con la luz del Sol, pudiendo absorberla, dispersarla o reflejarla ocasionando un cambio específico en la longitud de onda de la luz reflejada, este cambio depende de la composición química del contaminante, como si cada uno tuviera su propia firma espectral. Los sensores instalados en los satélites son como cámaras y miden cuánta luz es recibida, absorbida y reflejada por los contaminantes de manera diferenciada con base en su firma espectral y cuantifican su concentración de manera indirecta a través de índices de absorción y reflexión de la luz (Fig. 1).

Los satélites hacen escaneos analizando una columna vertical de aire de 10 km (Fig. 1). Con estas mediciones se producen imágenes donde cada parte de la imagen (píxel) registra la intensidad de respuesta captada por el sensor y se le asigna un color para facilitar su interpretación. Dependiendo de la tecnología del sensor y del algoritmo de recuperación, el tamaño de los píxeles va desde 1 Km hasta 100 Km. Entre más mediciones pueda efectuar en un área, mayor será su resolución y las mediciones serán más específicas. Dependiendo de la frecuencia orbital, las mediciones pueden ser horarias o incluso quincenales. Posteriormente, estas imágenes son procesadas para obtener sus valores y calibradas mediante modelos matemáticos de transporte químico y meteorológico, así como algoritmos informáticos para estimar la concentración de los contaminantes.

## ¿Qué satélites y sensores miden la calidad del aire?

Existe una gran cantidad de sensores satelitales; NASA opera el sensor MODIS, instalado en los satélites Terra y Aqua, y el sensor VIIRS, instalado en NOAA-20, que estiman las partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) con la “profundidad óptica de aerosoles” (AOD) que es la radiación que las partículas absorben. El sensor TROPOMI a bordo de Intelsat 40e registra cada hora el Ozono ( $O_3$ ), Dióxido de Nitrógeno ( $NO_2$ ) y Formaldehido. El satélite Aura mide con el sensor MLS Monóxido de Carbono (CO), Óxido Nitroso ( $NO_x$ ) y Dióxido de Azufre ( $SO_2$ ), y con el sensor OMI mide  $O_3$  y  $NO_2$ . El satélite Sentinel 5p de la ESA mide  $NO_2$ ,  $O_3$ , Formaldehído,  $SO_2$ , Metano, CO y aerosoles.

## ¿Dónde puede consultarse la información satelital y cómo puede usarse?

La NASA cuenta con un banco de imágenes históricas que permite analizar la evolución de los contaminantes del aire. Están disponibles en buscadores online, tales como Worldview, GIOVANNI, LAADS DAAC, entre otros. Si hay una imagen disponible para el contaminante, área y periodo elegido, la imagen puede descargarse para su posterior procesamiento con software libre como SNAP, Q-GIS y Google Earth, para analizar las mediciones de los sensores y compararlas con las mediciones superficiales de las redes de monitoreo y establecer una equivalencia. Así, es posible tener una idea de la calidad del aire en regiones que no cuentan con estaciones de monitoreo e informar a la población sobre la calidad del aire que respiran. NASA cuenta con un programa de entrenamiento online gratuito denominado ARSET, ya que busca que la información generada desde el espacio esté disponible para beneficio de todos.

## Los satélites como aliados en las contingencias ambientales

Debido a su gran cobertura, los satélites permiten vigilar la calidad del aire asociada a eventos de gran magnitud, tales como las tormentas de arena, las erupciones volcánicas, los eventos de contaminación masiva y los incendios forestales (Fig. 2). Con las imágenes satelitales se visualiza el desplazamiento de masas de aire contaminado, permitiendo alertar a la población sobre amenazas inminentes, como el polvo del Sahara (Fig. 2c). También es posible registrar eventos como en Nueva Delhi (India) en noviembre 2023, en donde se alcanzaron concentraciones de  $PM_{2.5}$  80 veces superiores al límite recomendado por la OMS ( $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); esto ocurrió porque las  $PM_{2.5}$  producto de la pirotecnia usada en las festividades religiosas y de las quemas agrícolas, quedaron atrapadas por una masa de aire frío (Fig. 2b). Estudios recientes han encontrado que la esperanza de vida de la población de Nueva Delhi podría haberse disminuido 9 años por la exposición crónica a la contaminación del aire (Greenstone et al., 2021).

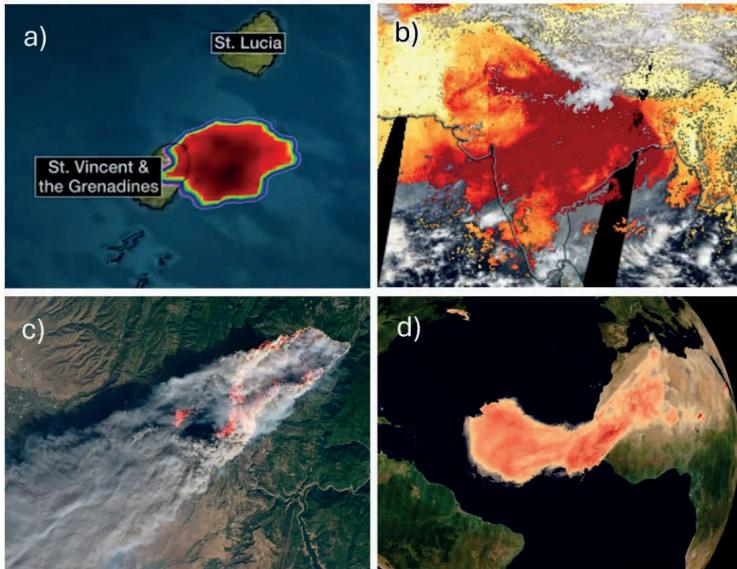


Fig. 2. a) Emisiones del volcán St. Vincent's La Soufrière en abril 2021 (NOAA, 2021).  
 b) Emisiones de partículas suspendidas en la India por festividades noviembre, 2023 (NASA, 2023). c) Incendio forestal en Butte, California, el 8 de noviembre de 2018 (NASA, 2018). d) Desplazamiento de tormenta de polvo del Sahara en abril 2024 (ESA, 2024).

## ¿Cómo nos afecta la mala calidad del aire?

Cuando nos exponemos a los contaminantes del aire podemos percibir diferentes molestias, ya que los gases como el  $O_3$ ,  $NO_2$  y  $SO_2$ , se disuelven en la humedad de las mucosas lo que puede ocasionar ardor en los ojos, nariz y garganta cuando pasamos mucho tiempo expuestos en el tráfico o cerca de otras fuentes de contaminación.

Los contaminantes ingresan a nuestro sistema respiratorio y los gases y las partículas más pequeñas ( $PM_{2.5}$ ) pueden llegar hasta los alveolos pulmonares alterando el metabolismo celular y generando reacciones alérgicas como el asma. Si la exposición es crónica, (de manera frecuente durante largos períodos), puede reducir la capacidad respiratoria. Algunos contaminantes pueden atravesar los alveolos e ingresar al torrente sanguíneo, llegando a diferentes órganos tales como el hígado, riñones, cerebro, entre otros, alterando su funcionamiento. Las partículas transportan diversas sustancias tóxicas como metales pesados y compuestos orgánicos que tienen la capacidad de alterar funciones enzimáticas y la respuesta inflamatoria, incrementando la incidencia de problemas cardiovasculares como hipertensión, arritmia y accidentes cerebro vasculares (Huang et al., 2017). Estos compuestos tóxicos pueden alterar también el ADN celular e incrementar el riesgo de desarrollar cáncer pulmonar.

Cabe mencionar que la contaminación del aire no nos afecta a todos por igual, existe un subconjunto de la población que sufre de un mayor impacto en su salud, se conoce como población vulnerable y está compuesto por infantes, adultos mayores, mujeres embarazadas, personas con enfermedades crónicas y personal expuesto ocupacionalmente a fuentes de contaminación. Con base en datos epidemiológicos y de monitoreo de la calidad del aire a través de un modelo de la OMS se estimó que en 2019 en la Ciudad de México casi 4000 de las muertes de personas mayores de 30 años ocurridas en ese año pudieron estar asociadas a la exposición a las partículas finas PM<sub>2.5</sub> (Neria-Hernández et al., 2024). Por lo que es muy importante conocer el estado de la calidad del aire y cuando esta sea mala es importante tomar precauciones como resguardar a la población vulnerable, evitar hacer ejercicio en áreas abiertas, y si es necesario desplazarse caminando, optar por calles secundarias menos transitadas, usar mascarillas Kn95, entre otras medidas.



Fig. 3. Efectos de la contaminación del aire. Fuente: Elaboración propia con base en McDuffie et al., (2021)

Como pudo observarse, la medición de la calidad del aire es una necesidad básica para alertar a la población y poder disminuir el impacto sanitario, por lo que las mediciones satelitales son una herramienta de alcance ilimitado que permiten realizar un monitoreo global lo cual es muy importante ya que la contaminación del aire transciende fronteras. Cada vez existen nuevos sensores, nuevos algoritmos y nuevos desarrollos, incluyendo aplicaciones de inteligencia artificial, para el monitoreo de la calidad del aire, lo que nos da “un respiro” de esperanza sobre nuestras capacidades para entender las fuentes emisoras de contaminantes, el comportamiento de los mismos e idealmente, mejorar nuestras capacidades de mitigación de los contaminantes atmosféricos para beneficio de la población.

## PÁGINAS WEB RECOMENDADAS CON INFORMACIÓN Y RECURSOS SOBRE IMÁGENES SATELITALES:

ESA. (2025). Education & training. Disponible en: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Education\\_training](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Education_training)

NASA. (2025). GIOVANNI, The Bridge Between Data and Science (buscador de imágenes satelitales). Disponible en: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

NASA. (2025). LAADS DAAC, (buscador de imágenes satelitales). Disponible en: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>

NASA. (2025). Programa de entrenamiento online gratuito de la ARSET. Disponible en: <https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training>

NASA. (2025). Worldview, (buscador de imágenes satelitales). Disponible en: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

## REFERENCIAS

DOF, Diario Oficial de la Federación. ACUERDO que establece la Política en materia satelital del Gobierno Federal. 2023. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5712152&fecha=21/12/2023#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5712152&fecha=21/12/2023#gsc.tab=0). Accedido Ene 2025

Greenstone, Michael, Kenneth Lee, and Harshil Sahai. "Indoor air quality, information, and socioeconomic status: Evidence from Delhi." AEA Papers and Proceedings. Vol. 111. 2014 Broadway, Suite 305, Nashville, TN 37203: American Economic Association, 2021. DOI: 10.1257/pandp.20211006

Huang, Z., Zhou, Y., Lu, Y., Duan, Y., Tang, X., Deng, Q., & Yuan, H. A case-crossover study between fine particulate matter elemental composition and emergency admission with cardiovascular disease. *Acta Cardiologica Sinica*, 33[1], pp. 66, 2017. doi: 10.6515/ACS20160118B

McDuffie, E. E., Martin, R. V., Spadaro, J. V., Burnett, R., Smith, S. J., O'Rourke, P., ... & Brauer, M. Source sector and fuel contributions to ambient PM<sub>2.5</sub> and attributable mortality across multiple spatial scales. *Nature communications*, 12[1], pp. 1-12, 2021. doi: 10.6515/ACS20160118B

NASA. *What Is a Satellite?* | NASA Space Place – NASA Science for Kids. Spaceplace.nasa.gov, Sep. 2023, <https://spaceplace.nasa.gov/satellite/en/>. Accedido Ene 2025.

Angélica Neria-Hernández, Violeta Mugica-Álvarez, Arturo ColínCruz, Juan Carlos Sánchez-Meza & Araceli Amaya-Chávez. Air pollution in cities with unplanned urban growth, a case study of Toluca Valley: trends and health impacts compared with Mexico City. *Meio ambiente e desenvolvimento sustentável: desafios e soluções*, pp. 130-150. <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-3195216/v1>

OMS, Organización Mundial de la Salud, Household air pollution, Fact Sheets. 2022, [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health#:~:text=The%20combined%20effects%20of%20ambient,\(COPD\)%20and%20lung%20cancer](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health#:~:text=The%20combined%20effects%20of%20ambient,(COPD)%20and%20lung%20cancer). Accedido en Ene 2025.

SEA, Sociedad Española de Astronomía. Satélite, glosario. 2024, <https://www.sea-astronomia.es/glosario/satelite>. Accedido en Ene 2025.

Zhang, Y., Li, Z., Bai, K., Wei, Y., Xie, Y., Zhang, Y., ... & Li, D. Satellite remote sensing of atmospheric particulate matter mass concentration: Advances, challenges, and perspectives. *Fundamental Research*, 1[3], pp. 240-258, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.04.007>.

## **APOYO FINANCIERO**

Este trabajo fue financiado por el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) a través del apoyo otorgado por el programa Investigadoras e Investigadores COMECyT con folio CAT2024-0104.

## **CONFLICTOS DE INTERESES**

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o no financieros que declarar que sean relevantes para el contenido de este artículo. Todos los autores certifican que no tienen afiliaciones ni participación en ninguna organización o entidad con algún interés financiero o no financiero en el tema o los materiales discutidos en este manuscrito. Los autores no tienen intereses financieros o de propiedad en ningún material discutido en este artículo.