

Estimación Espaciotemporal de Monóxido de Carbono (CO) Mediante Teledetección en la Comarca Lagunera

Spatiotemporal Estimation of Carbon Monoxide (CO) Using Remote Sensing in the Comarca Lagunera Region

Servín-Prieto, A.J.¹; Hernández-López, M.² ✉, Juárez-Hernández, J.M.³; Velásquez-Chávez, T.⁴; Martínez-Burrola, J.M.⁵

Datos de Adscripción:

¹ Servín Prieto, Alan Joel
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México. Tecnológico Nacional de México.
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>
ROR ID: <https://ror.org/04bjbt12>
alan.sp@itslerdo.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-7875>

² ✉ Hernández López, Mónica
TecNM: Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón, Coahuila. México.
monicahlop@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-127X>

³ Juárez Hernández, José María
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>
ID: <https://ror.org/04bjbt12>
jose.jh@itslerdo.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5790-651X>

⁴ Velásquez Chávez, Tania Elizabeth
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>
ROR ID: <https://ror.org/04bjbt12>
tania.vc@itslerdo.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7788-1786>

⁵ Martínez Burrola, Juan Manuel
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.
ROR ID: <https://ror.org/00davry38>
ROR ID: <https://ror.org/04bjbt12>
juan.mb@itslerdo.edu.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0296-3076>

Resumen – La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales en regiones urbanas e industriales debido a sus efectos adversos sobre la salud humana y el ambiente. Entre los contaminantes más relevantes destaca el monóxido de carbono (CO), generado por procesos de combustión incompleta asociados al transporte, actividades industriales y prácticas agrícolas. En este contexto, la sensoria remota se ha consolidado como una herramienta poderosa en el monitoreo de contaminantes a escala regional. Este estudio tiene el objetivo de analizar la distribución espaciotemporal del monóxido de carbono en la región de la Comarca Lagunera, ubicada entre los estados de Durango y Coahuila, mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel-5P con sensor TROPOMI durante el periodo 2019–2023. Los datos fueron procesados en el software QGIS para generar composiciones temporales y realizar un análisis de estadística zonal en distintas localidades. Los resultados evidencian concentraciones promedio de CO en un rango de 0.0230 a 0.0354 mol/m², con

un patrón temporal definido y valores máximos durante los meses de marzo a junio, particularmente en abril y mayo. Este comportamiento se asocia a las actividades agrícolas y las condiciones atmosféricas que limitan la dispersión de contaminantes. Asimismo, se identificaron variaciones espaciales entre zonas urbanas y áreas con intensa actividad agrícola, donde se registran mayores concentraciones del contaminante. Estos hallazgos confirman la influencia de las actividades antropogénicas en la dinámica del monóxido de carbono en la región y su utilidad en la gestión ambiental.

Palabras Clave – Calidad del Aire, Comarca Lagunera, Monóxido de Carbono, Sentinel-5P, Teledetección.

Abstract - Atmospheric pollution is one of the main environmental problems in urban and industrial regions due to its adverse effects on human health and the environment. Among the most relevant pollutants, carbon monoxide (CO) stands out, generated by incomplete combustion processes associated with transportation, industrial activities, and agricultural practices. In this context, remote sensing has been established as an effective tool for monitoring pollutants at a regional scale. The aim of this study is to analyze the spatiotemporal distribution of carbon monoxide in the Comarca Lagunera region, located between the states of Durango and Coahuila, using Sentinel-5P satellite imagery with the TROPOMI sensor during the period 2019–2023. The data were processed using QGIS software to generate temporal composites and perform zonal statistical analysis across different localities. The results show average CO concentrations ranging from 0.0230 to 0.0354 mol/m², with a defined temporal pattern and maximum values occurring between March and June, particularly in April and May. This behavior is associated with agricultural activities and atmospheric conditions that limit pollutant dispersion. Additionally, spatial variations were identified between urban areas and regions with intense agricultural activity, where higher concentrations of the pollutant were recorded. These findings confirm the influence of anthropogenic activities on the dynamics of carbon monoxide in the region and highlight its relevance for environmental management.

Keywords – Air Quality, Carbon Monoxide, Comarca Lagunera, Remote Sensing, Sentinel-5P.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la contaminación atmosférica ha surgido como uno de los principales desafíos ambientales a nivel global, debido principalmente al incremento de gases contaminantes derivados de actividades industriales y antropogénicas (*World Health Organization*, 2021; *United Nations Environment Programme*, 2019). Este fenómeno está estrechamente relacionado con el cambio climático, ya que contribuye a alteraciones persistentes en los ecosistemas, como el aumento de la temperatura global, variaciones en los patrones climáticos y modificaciones en la composición química de la atmósfera y los océanos (IPCC, 2021; Caselli, 2020).

Entre los contaminantes atmosféricos más relevantes se encuentra el monóxido de carbono (CO), un gas incoloro e inodoro, altamente tóxico, que se genera principalmente por procesos de combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa (EPA, 2022; Seinfeld & Pandis, 2016). Las principales fuentes de emisión de CO incluyen el transporte vehicular, las actividades industriales, la quema de residuos agrícolas y otras prácticas relacionadas con el uso de hidrocarburos (Zhang *et al.*, 2019). La exposición a concentraciones elevadas de CO representa un riesgo significativo para la salud humana, afectando a los sistemas respiratorio y cardiovascular, e incluso provocando efectos neurológicos en casos de exposición prolongada (EPA, 2022).

Diversos estudios han demostrado la eficiencia del uso de sensores remotos para el análisis de gases contaminantes en la atmósfera, destacando el sensor Sentinel-5P, equipado con el instrumento TROPOMI, que permite estimar concentraciones de contaminantes como el CO con alta resolución espacial y temporal (Levelt *et al.*, 2018). En investigaciones recientes se han empleado datos de TROPOMI para evaluar la distribución espacial y temporal de contaminantes atmosféricos en diferentes regiones del mundo, lo que evidencia su capacidad para identificar patrones de emisión y zonas críticas de contaminación (Eskes *et al.*, 2022; Griffin *et al.*, 2019).

En México, y principalmente en regiones con alta actividad agrícola e industrial, como la Región Lagunera, la emisión de contaminantes como el CO representa una problemática relevante debido a la combinación de fuentes de emisión y condiciones ambientales que favorecen su acumulación (INEGI, 2020). La región se caracteriza por la presencia de actividades agrícolas intensivas, crecimiento urbano y desarrollo industrial, factores que contribuyen significativamente a la generación de emisiones contaminantes, especialmente durante el periodo de quema de residuos agrícolas y la temporada de primavera-verano, cuando por lo general existe una alta demanda energética (Yokelson *et al.*, 2008). Asimismo, las condiciones meteorológicas locales, como la baja velocidad del viento, la presencia de inversiones térmicas, pueden limitar la dispersión de contaminantes y, por el contrario, favorecer su concentración en la atmósfera (Jacob & Winner, 2009; Zhang *et al.*, 2015).

Aun cuando Sentinel-5P ha sido ampliamente utilizado para el monitoreo atmosférico a escala global, existen pocos estudios que documenten el comportamiento espaciotemporal del CO en regiones agrícolas semiáridas del norte de México, particularmente en la Comarca Lagunera. (Strets *et al.*, 2013; Eskes *et al.*, 2022). El objetivo de este estudio es analizar la

distribución espaciotemporal del CO en la Comarca Lagunera mediante datos del satélite Sentinel-5P durante el periodo 2019-2023, utilizando técnicas de análisis geoespacial en un entorno de Sistemas de Información Geográfica. Con ello, se busca identificar patrones temporales, variabilidad espacial y posibles zonas de concentración del contaminante, lo que contribuye a generar información relevante para la gestión de la calidad del aire y la toma de decisiones ambientales.

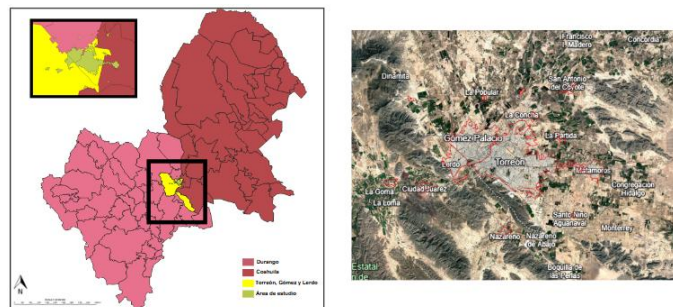
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Área de estudio

La investigación se desarrolló en la región de la Comarca Lagunera, ubicada entre los estados de Durango y Coahuila, en México (Figura 1).

Figura 1

Macrolocalización del área de estudio



Esta región se caracteriza por una importante actividad agrícola, ganadera, urbana e industrial, factores que contribuyen de manera significativa a la generación de contaminantes atmosféricos.

La Tabla 1 muestra las localidades consideradas en el área de estudio.

Tabla 1

Localidades incluidas en el área de estudio.

Localidades
Torreón
Matamoros
San Antonio del Coyote
Santo Niño Aguanaval
La Partida
Gómez Palacio
Los Azules (Campestre)
La Popular
San Felipe
Sierra Hermosa
Carlos Real (San Carlos)
Lerdo
León Guzmán
Nazareno
Ciudad Juárez

Asimismo, las condiciones climáticas semiáridas, las altas temperaturas y los periodos de baja dispersión atmosférica favorecen la acumulación de contaminantes, como el monóxido de carbono (CO).

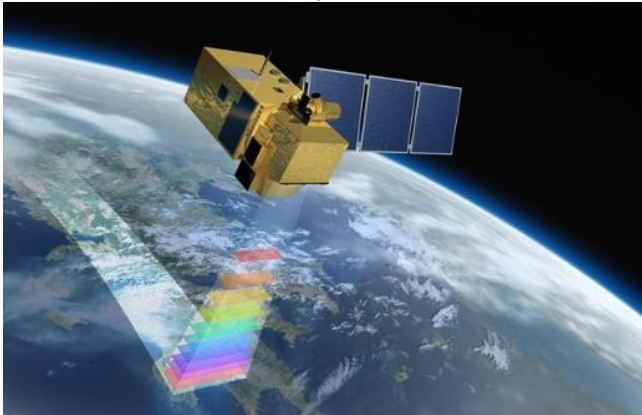
El área analizada comprende municipios de la zona metropolitana de La Laguna, que incluyen Torreón, Matamoros, Gómez Palacio y Lerdo, donde existe una elevada dinámica antropogénica asociada al transporte vehicular, a procesos industriales y a la quema de residuos orgánicos.

2.2 Fundamentos de Teledetección

La teledetección o sensoría remota es una tecnología que permite obtener información sobre la superficie terrestre y la atmósfera mediante sensores instalados en plataformas espaciales, aéreas o terrestres (Figura 2).

Figura 2

Satélite recolectando datos de la superficie terrestre.



Los sensores registran la energía electromagnética que interactúa con la superficie terrestre, lo que permite analizar variables ambientales a partir de imágenes satelitales. Entre las principales variables empleadas en teledetección destacan la reflectancia, la radiancia y la respuesta espectral de los objetos observados.

En el monitoreo de contaminantes atmosféricos, la teledetección satelital constituye una herramienta eficiente por su capacidad para generar información continua, distribuida espacialmente y con cobertura regional (Figura 3).

Figura 3

Sustancias liberadas a la atmósfera por chimeneas industriales.



2.3 Satélite Sentinel-5P y TROPOMI

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron datos

provenientes del satélite Sentinel-5P, equipado con el sensor TROPOMI (*Tropospheric Monitoring Instrument*) (Figura 4). Este satélite fue desarrollado por la Agencia Espacial Europea con el objetivo de monitorear contaminantes atmosféricos y variables relacionadas con la calidad del aire.

Figura 4

Sentinel-5P y sensor TROPOMI



El sensor TROPOMI es un espectrómetro de imágenes que permite detectar contaminantes atmosféricos como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y metano (CH₄).

El satélite presenta cobertura global con una resolución temporal diaria gracias a su ancho de barrido de aproximadamente 2,600 km y opera en una órbita heliosíncrona a una altitud cercana a 824 km (Figura 5).

Para este estudio se utilizaron productos de Level-2 correspondientes a concentraciones geolocalizadas de CO (Tabla 2).

Figura 5

Órbita del satélite Sentinel-5P

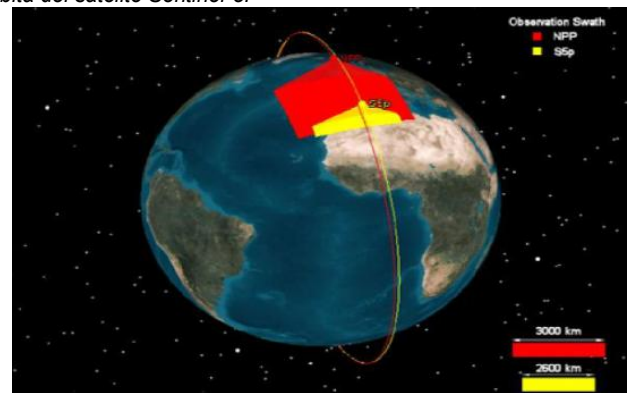


Tabla 2

Descripción técnica del satélite Sentinel-5P y sensor TROPOMI

Característica	Valor
Satélite	Sentinel-5P
Sensor	TROPOMI
Variable	CO
Resolución espacial	7 × 7 km
Resolución temporal	Global diaria
Tipo de producto	Level-2

Los productos de Level-2 proporcionan información atmosférica geolocalizada de alta resolución espacial y temporal. Los productos disponibles son las columnas totales de los gases contaminantes.

2.4 Monóxido de carbono (CO)

El CO es un gas contaminante que se libera como resultado de procesos de combustión incompleta, tanto de combustibles fósiles como de biomasa, cuando el oxígeno disponible no es suficiente para una combustión completa. Este contaminante representa uno de los principales problemas ambientales en América Latina y constituye una de las sustancias más relevantes entre los contaminantes atmosféricos a nivel global (Téllez *et al.*, 2006).

Este gas representa una amenaza importante para la salud humana y animal debido a su capacidad de unirse a la hemoglobina en la sangre, lo que reduce el transporte de oxígeno hacia los tejidos del organismo. Debido a que carece de olor y color, su detección resulta difícil y síntomas como el dolor de cabeza pueden aparecer cuando la exposición ya es considerable. Aunque se dispersa fácilmente en espacios abiertos, en espacios cerrados puede acumularse rápidamente hasta alcanzar concentraciones altamente tóxicas e incluso letales. Entre las principales fuentes de emisión de CO se encuentran la quema de combustibles fósiles, la combustión de biomasa y los procesos de oxidación atmosférica del metano y otros hidrocarburos (Spedding, 2021).

2.5 Obtención y procesamiento de imágenes satelitales

Los productos Sentinel-5P Level-2 correspondientes al contaminante CO se descargaron del *Copernicus Open Access Hub*. Posteriormente, las imágenes fueron reproyectadas al sistema de referencia WGS84/UTM, zona 13N, y sometidas a un proceso de delimitación espacial mediante el polígono del área de estudio. Finalmente, se aplicó la técnica de estadística zonal para obtener los promedios mensuales de concentración en las localidades de interés (Figura 6).

2.6 Análisis espaciotemporal del monóxido de carbono

El análisis espaciotemporal se desarrolló mediante la comparación de las concentraciones de CO durante el periodo 2019-2023. Se realizaron análisis temporales para identificar los meses con mayor presencia del contaminante y determinar patrones estacionales.

De igual manera, se efectuó un análisis espacial para identificar zonas con mayores concentraciones de monóxido de carbono, particularmente en áreas urbanas, corredores industriales y regiones agrícolas con presencia de quema de residuos.

Los resultados obtenidos permitieron identificar variaciones espaciales y temporales asociadas a actividades antropogénicas y condiciones meteorológicas presentes en la región.

2.7 Elaboración cartográfica y representación de resultados.

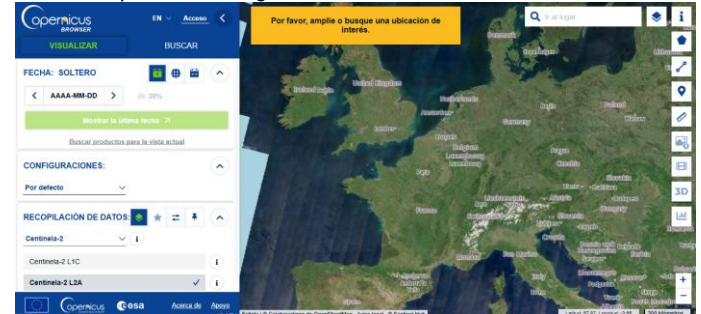
Se generaron mapas temáticos de concentraciones de CO utilizando herramientas SIG en el software Qgis. Los mapas

permitieron representar visualmente la distribución espacial del contaminante en distintos periodos temporales.

Asimismo, se elaboraron gráficas y composiciones cartográficas para facilitar la interpretación de las tendencias, las zonas críticas y el comportamiento temporal del monóxido de carbono en la Comarca Lagunera.

Figura 6

Plataforma para la descarga de datos del satélite Sentinel-5P



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Distribución espacial de las concentraciones de CO

A partir del procesamiento de imágenes del sensor TROPOMI del satélite Sentinel-5P, se obtuvieron mapas mensuales y anuales de la concentración de CO para el área de estudio durante el periodo 2019-2023.

Los resultados mostraron variaciones espaciales importantes en las concentraciones de CO entre las distintas localidades analizadas. Las mayores concentraciones se identificaron principalmente en zonas urbanas y agrícolas de Gómez Palacio, Lerdo, Torreón y Matamoros. Los patrones espaciales observados en este estudio coinciden con los descritos por Griffin *et al.* (2019), quienes demostraron que los productos del sensor TROPOMI permiten identificar áreas en las que las actividades humanas tienen una mayor influencia sobre la calidad del aire. En el mismo sentido, Eskes *et al.* (2022) señalan que el Sentinel-5P ofrece información útil para analizar la variabilidad espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos a escala regional. Estas capacidades, basadas en las características técnicas del sensor descritas por Levelt *et al.* (2018), permiten el monitoreo continuo de las emisiones, especialmente en regiones donde la infraestructura de medición en tierra es limitada. En la Comarca Lagunera, las mayores concentraciones se observan en las zonas de mayor actividad agrícola, industrial y urbana, lo que refuerza la influencia de estas fuentes de emisión en la distribución espacial del monóxido de carbono (INEGI, 2020).

En los mapas obtenidos se observan tonalidades de color azul más intensas en determinados meses del año, lo que indica una mayor presencia del contaminante atmosférico (Figuras 7 – 11). Las zonas rurales cercanas a áreas de cultivo también presentan concentraciones relevantes de CO, especialmente durante la temporada de preparación de los suelos agrícolas.

Figura 7

Variación del CO durante el año 2019

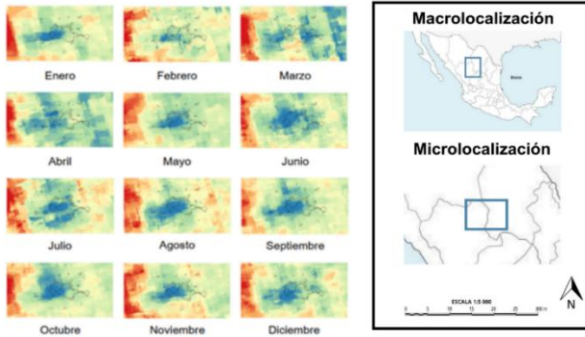


Figura 8

Variación del CO durante el año 2020

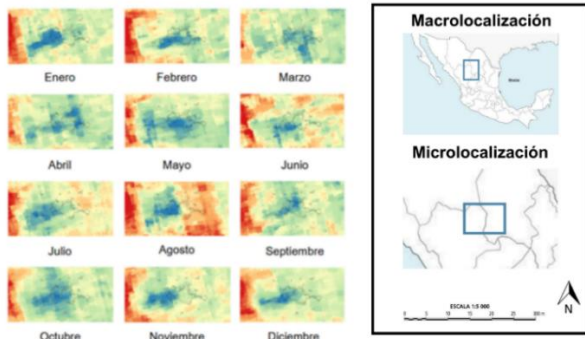


Figura 9

Variación del CO durante el año 2021

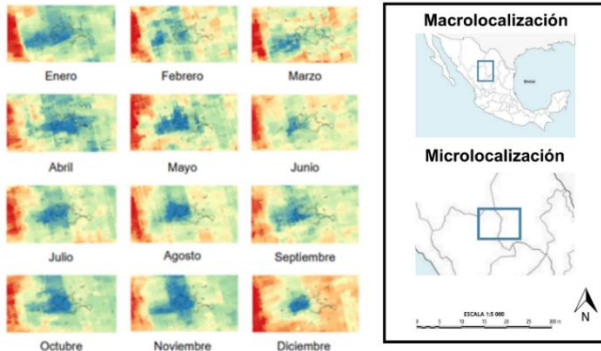


Figura 10

Variación del CO durante el año 2022

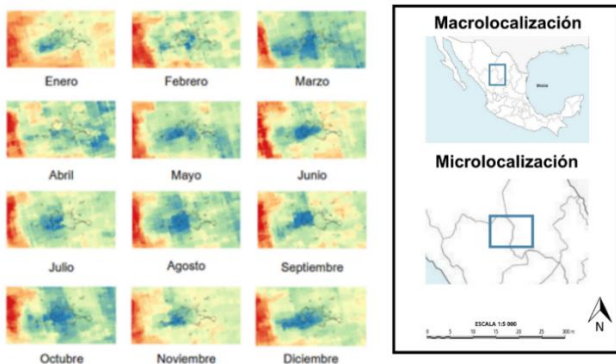
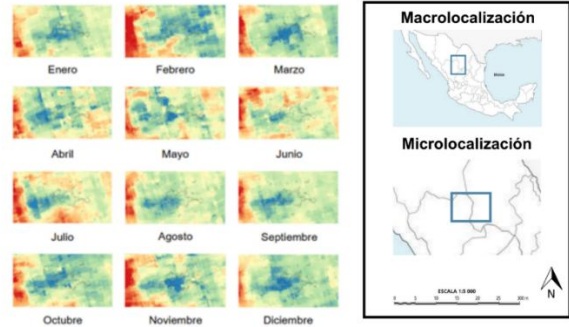


Figura 11

Variación del CO durante el año 2023



3.2 Variación temporal del CO

El análisis temporal permitió identificar un patrón recurrente de incremento de las concentraciones de CO entre marzo y junio en la mayoría de las localidades del área de estudio. En la figura 12 se muestra un incremento de la concentración de CO durante el periodo de mayo a junio en la ciudad de Gómez Palacio, lo cual puede atribuirse a la intensa actividad industrial, agrícola y pecuaria de la zona.

Este comportamiento puede explicarse, en parte, por las condiciones meteorológicas predominantes durante el periodo analizado. De acuerdo con Jacob y Winner (2009), factores como una menor dispersión atmosférica y una mayor estabilidad del aire favorecen la permanencia de los contaminantes en la atmósfera. A esto se suma el incremento de las actividades agrícolas propias de la preparación del suelo, y en algunos casos, la quema de residuos orgánicos, prácticas que incrementan las emisiones de CO y contribuyen a explicar el patrón estacional observado en la región.

Figura 12

Variabilidad temporal del CO en la localidad de Gómez Palacio

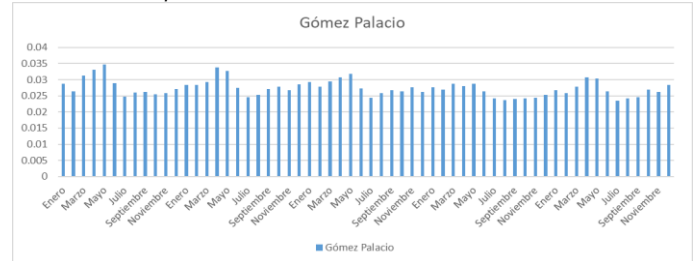


Figura 13

Variabilidad temporal del CO en la localidad de Torreón

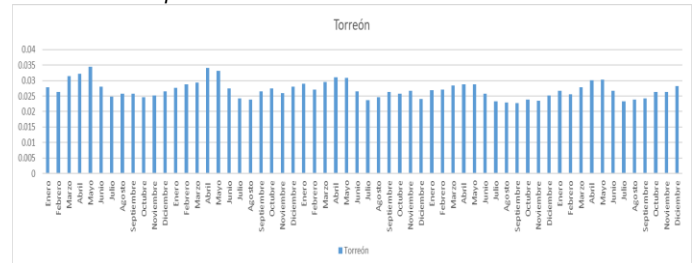


Figura 14
Variabilidad temporal del CO en la localidad de Lerdo

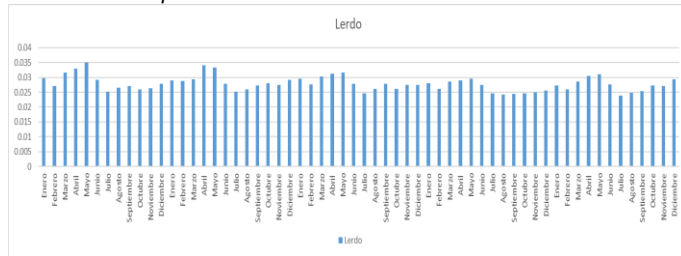
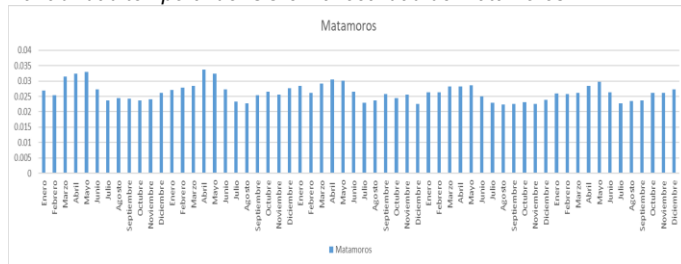


Figura 15
Variabilidad temporal del CO en la localidad de Matamoros



Estos comportamientos se asocian principalmente con la quema de residuos agrícolas, la preparación de terrenos para la siembra, el incremento en el uso de maquinaria agrícola y las condiciones atmosféricas de baja dispersión.

En localidades agrícolas como Santo Niño Aguanaval, La Partida, León Guzmán y Ciudad Juárez, el incremento de CO coincidió temporalmente con las actividades de manejo agrícola previas a la temporada de cultivo.

Asimismo, en algunas localidades urbanas se detectaron concentraciones elevadas durante los meses invernales, particularmente en diciembre, posiblemente relacionadas con el incremento del uso de combustibles para calefacción y con condiciones meteorológicas que limitan la dispersión de los contaminantes.

Figura 16
Promedio mensual de CO para el año 2019

Localidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Matamoros	0.0269	0.0254	0.0314	0.0324	0.0329	0.0274	0.0238	0.0245	0.0243	0.0237	0.0240	0.0262
San Antonio del Coyote	0.0269	0.0254	0.0310	0.0322	0.0332	0.0269	0.0230	0.0240	0.0243	0.0237	0.0234	0.0268
Santo Niño Aguanaval	0.0282	0.0284	0.0311	0.0319	0.0334	0.0269	0.0241	0.0244	0.0245	0.0236	0.0234	0.0256
Torreón	0.0279	0.0284	0.0315	0.0322	0.0344	0.0281	0.0248	0.0258	0.0257	0.0247	0.0253	0.0266
La Partida	0.0276	0.0256	0.0315	0.0317	0.0332	0.0276	0.0237	0.0245	0.0248	0.0241	0.0243	0.0268
Los Azulejos (Campestre)	0.0276	0.0260	0.0317	0.0320	0.0336	0.0279	0.0240	0.0246	0.0249	0.0240	0.0244	0.0260
Gómez Palacio	0.0288	0.0283	0.0312	0.0330	0.0347	0.0288	0.0247	0.0260	0.0262	0.0255	0.0258	0.0272
La Popular	0.0269	0.0252	0.0307	0.0322	0.0332	0.0276	0.0244	0.0259	0.0256	0.0246	0.0243	0.0259
San Felipe	0.0270	0.0259	0.0316	0.0320	0.0336	0.0273	0.0244	0.0245	0.0252	0.0237	0.0236	0.0256
Sierra Hermosa	0.0280	0.0257	0.0307	0.0316	0.0322	0.0276	0.0243	0.0245	0.0245	0.0243	0.0240	0.0259
Lerdo	0.0297	0.0271	0.0316	0.0330	0.0350	0.0292	0.0252	0.0264	0.0272	0.0259	0.0260	0.0278
Carlos Real (San Carlos)	0.0295	0.0271	0.0311	0.0335	0.0354	0.0289	0.0249	0.0268	0.0264	0.0260	0.0261	0.0280
León Guzmán	0.0284	0.0259	0.0319	0.0330	0.0336	0.0278	0.0243	0.0259	0.0262	0.0245	0.0252	0.0271
Nazareno	0.0269	0.0259	0.0300	0.0328	0.0334	0.0273	0.0242	0.0252	0.0247	0.0234	0.0237	0.0261
Ciudad Juárez	0.0289	0.0265	0.0322	0.0330	0.0345	0.0280	0.0248	0.0261	0.0259	0.0253	0.0258	0.0271

Figura 17
Promedio mensual de CO para el año 2020

Localidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Matamoros	0.0271	0.0279	0.0284	0.0337	0.0324	0.0274	0.0234	0.0227	0.0255	0.0264	0.0255	0.0276
San Antonio del Coyote	0.0270	0.0272	0.0284	0.0329	0.0315	0.0272	0.0233	0.0233	0.0253	0.0263	0.0252	0.0271
Santo Niño Aguanaval	0.0276	0.0281	0.0286	0.0342	0.0324	0.0265	0.0235	0.0231	0.0250	0.0262	0.0259	0.0277
Torreón	0.0278	0.0280	0.0294	0.0342	0.0331	0.0275	0.0242	0.0238	0.0266	0.0274	0.0259	0.0280
La Partida	0.0282	0.0275	0.0293	0.0346	0.0326	0.0267	0.0230	0.0231	0.0249	0.0261	0.0253	0.0276
Los Azulejos (Campestre)	0.0277	0.0283	0.0284	0.0352	0.0320	0.0274	0.0231	0.0232	0.0258	0.0262	0.0259	0.0269
Gómez Palacio	0.0284	0.0283	0.0294	0.0339	0.0326	0.0275	0.0245	0.0253	0.0272	0.0278	0.0267	0.0286
La Popular	0.0264	0.0275	0.0284	0.0332	0.0315	0.0269	0.0233	0.0235	0.0265	0.0273	0.0253	0.0271
San Felipe	0.0274	0.0278	0.0280	0.0334	0.0316	0.0263	0.0233	0.0233	0.0269	0.0263	0.0255	0.0271
Sierra Hermosa	0.0268	0.0275	0.0277	0.0331	0.0318	0.0264	0.0244	0.0244	0.0247	0.0266	0.0264	0.0267
Lerdo	0.0291	0.0288	0.0295	0.0341	0.0333	0.0278	0.0252	0.0260	0.0273	0.0281	0.0274	0.0292
Carlos Real (San Carlos)	0.0288	0.0287	0.0294	0.0350	0.0334	0.0284	0.0251	0.0261	0.0269	0.0279	0.0271	0.0294
León Guzmán	0.0288	0.0282	0.0290	0.0337	0.0332	0.0273	0.0260	0.0245	0.0266	0.0278	0.0276	0.0290
Nazareno	0.0268	0.0272	0.0282	0.0329	0.0328	0.0278	0.0235	0.0240	0.0254	0.0273	0.0253	0.0274
Ciudad Juárez	0.0289	0.0292	0.0281	0.0343	0.0326	0.0284	0.0253	0.0249	0.0269	0.0281	0.0274	0.0290

Figura 18
Promedio mensual de CO para el año 2021

Localidades	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Matamoros	0.0284	0.0281	0.0292	0.0306	0.0302	0.0285	0.0229	0.0237	0.0257	0.0245	0.0256	0.0226
San Antonio del Coyote	0.0285	0.0285	0.0286	0.0300	0.0304	0.0282	0.0230	0.0232	0.0254	0.0241	0.0251	0.0225
Santo Niño Aguanaval	0.0282	0.0285	0.0294	0.0297	0.0299	0.0263	0.0226	0.0231	0.0249	0.0245	0.0246	0.0227
Torreón	0.0291	0.0271	0.0296	0.0311	0.0309	0.0286	0.0238	0.0246	0.0263	0.0257	0.0267	0.0241
La Partida	0.0288	0.0261	0.0301	0.0308	0.0303	0.0260	0.0224	0.0240	0.0251	0.0243	0.0249	0.0230
Los Azulejos (Campestre)	0.0282	0.0261	0.0295	0.0301	0.0306	0.0260	0.0226	0.0235	0.0259	0.0244	0.0253	0.0229
Gómez Palacio	0.0278	0.0295	0.0307	0.0319	0.0272	0.0245	0.0259	0.0267	0.0265	0.0265	0.0276	0.0263
La Popular	0.0290	0.0268	0.0288	0.0301	0.0301	0.0264	0.0237	0.0247	0.0265	0.0254	0.0272	0.0238
San Felipe	0.0286	0.0257	0.0290	0.0302	0.0305	0.0255	0.0229	0.0232	0.0257	0.0243	0.0256	0.0234
Sierra Hermosa	0.0278	0.0276	0.0283	0.0300	0.0300	0.0266	0.0236	0.0243	0.0256	0.0241	0.0259	0.0238
Lerdo	0.0295	0.0277	0.0304	0.0312	0.0317	0.0279	0.0246	0.0261	0.0278	0.0262	0.0274	0.0274
Carlos Real (San Carlos)	0.0294	0.0276	0.0308	0.0314	0.0314	0.0279	0.0244	0.0251	0.0276	0.0264	0.0271	0.0285
León Guzmán	0.0294	0.0286	0.0306	0.0303	0.0313	0.0269	0.0238	0.0248	0.0267	0.0253	0.0271	0.0243
Nazareno	0.0284	0.0275	0.0292	0.0305	0.0302	0.0266	0.0232	0.0240	0.0260	0.0249	0.0266	0.0237
Ciudad Juárez	0.0294	0.0273	0.0310	0.0305	0.0311	0.0284	0.0246	0.0248	0.0267	0.0257	0.0272	0.0255

3.3 Relación entre actividades antropogénicas y concentraciones de CO

Los resultados sugieren una relación significativa entre las concentraciones de CO y las actividades antropogénicas presentes en la región. Las zonas urbanas mostraron concentraciones asociadas a las actividades industriales y a la movilidad vehicular, mientras que las zonas rurales presentaron aumentos relacionados principalmente con las prácticas agrícolas y la quema de biomasa.

En las áreas de Gómez Palacio y Torreón se identificaron concentraciones elevadas de contaminantes debido a la intensa movilidad vehicular y al desarrollo industrial de ambas regiones. Además, el transporte pesado asociado a las actividades industriales contribuye de manera significativa a las emisiones de contaminantes atmosféricos.

Por otra parte, localidades como Matamoros, San Antonio del Coyote y La Popular presentaron concentraciones elevadas asociadas al uso de maquinaria agrícola y a la quema de residuos de cultivos.

Las condiciones climáticas semiáridas presentes en la Comarca Lagunera, caracterizadas por altas temperaturas, baja humedad y limitada cobertura vegetal, también favorecen la acumulación de contaminantes atmosféricos y dificultan su dispersión.

El comportamiento registrado ha sido documentado en otros estudios basados en datos del sensor TROPOMI, en los que se destaca que la combinación de actividades humanas y condiciones atmosféricas locales determina la variabilidad espacial de los contaminantes (Eskes *et al.*, 2022).

3.4 Comparación espacial entre localidades

La comparación entre localidades permitió identificar diferencias importantes en el comportamiento espacial del CO. Las concentraciones más elevadas de CO se presentaron en: Gómez Palacio, Torreón, Lerdo y Matamoros.

Mientras que las localidades con menor densidad poblacional mostraron concentraciones moderadas, aunque con incrementos estacionales bien identificados derivados de las prácticas agrícolas de la zona.

Las zonas semiáridas o con baja cobertura vegetal, como Sierra Hermosa y Nazareno, mostraron persistencia del contaminante debido a la circulación atmosférica limitada y a la menor capacidad de dispersión.

IV. CONCLUSIONES

La obtención de imágenes de satélite mediante el sensor TROPOMI del satélite Sentinel-5P se ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad para el monitoreo de contaminantes atmosféricos. Este satélite permite detectar y analizar gases como el monóxido de carbono (CO), entre otros compuestos presentes en la atmósfera. Asimismo, mediante el uso de estos productos fue posible delimitar el área de estudio según la resolución espacial y recopilar la información necesaria para evaluar las concentraciones de los contaminantes establecidos al inicio de la investigación.

A partir de los datos obtenidos, se analizó el comportamiento espacial de la calidad del aire e identificaron posibles factores asociados a la presencia y la variación del CO.

Como parte de trabajos futuros, se pretende relacionar la información satelital obtenida con datos registrados por la estación de monitoreo *in situ* ubicada en la ciudad de Torreón, en el estado de Coahuila, así como compararla con los criterios establecidos por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en la NOM-172-SEMARNAT-2023, la cual establece los lineamientos para la obtención y la comunicación del índice de calidad del aire y de los riesgos asociados a la salud.

Los resultados obtenidos evidencian el potencial de Sentinel-5P como herramienta para los programas regionales de vigilancia de la calidad del aire, especialmente en regiones con infraestructura de monitoreo directo limitada.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y al Instituto Tecnológico de Torreón por el apoyo académico y técnico brindado durante el desarrollo de esta investigación.

Por otro lado, reconocemos a la Agencia Espacial Europea (ESA) por proporcionar acceso libre a los datos de satélite.

VI. REFERENCIAS

Caselli, M. (2020). Atmospheric pollution and climate change: Impacts and mitigation strategies. *Environmental Science and Policy*, 114, 15–27.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.08.005>

Environmental Protection Agency (EPA). (2022). *Carbon monoxide's impact on indoor air quality*. United States Environmental Protection Agency.
<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality>

Eskes, H., van Geffen, J., Boersma, F., Sneep, M., Apituley, A., Loyola, D., & Veefkind, P. (2022). Sentinel-5P TROPOMI atmospheric products: Monitoring air pollution at global scale. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(3), 1025–1048.
<https://doi.org/10.5194/amt-15-1025-2022>

Griffin, D., McLinden, C., Dufour, G., & Fioletov, V. (2019). High-resolution mapping of nitrogen dioxide with TROPOMI: First results and applications. *Remote Sensing of Environment*, 221, 419–426.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.021>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Anuario estadístico y geográfico de Coahuila y Durango 2020*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>

Jacob, D. J., & Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43(1), 51–63.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>

Levelt, P. F., van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Malkki, A., Visser, H., de Vries, J., Stammes, P., Lundell, J. O. V., & Saari, H. (2018). The Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1), 541–561.
<https://doi.org/10.5194/amt-11-541-2018>

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). Wiley.

Spedding, D. J. (2021). Carbon monoxide emissions and environmental implications. *Journal of Environmental Management*, 287, 112–130.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112130>

Streets, D. G., Canty, T., Carmichael, G. R., de Foy, B., Dickerson, R. R., Duncan, B. N., Edwards, D. P., Haynes, J. A., Henze, D. K., Houyoux, M. R., Jacob, D. J., Krotkov, N. A., Lamsal, L. N., Liu, Y., Lu, Z., Martin, R. V., Pfister, G. G., Pinder, R. W., Salawitch, R. J., & Wecht, K. J. (2013). Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability. *Atmospheric Environment*, 77, 1011–1042.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.051>

- Téllez, J., Rodríguez, A., & Fajardo, M. (2006). Contaminación por monóxido de carbono: Un problema de salud ambiental. *Revista de Salud Pública*, 8(1), 108–117. <https://doi.org/10.1590/S0124-00642006000100010>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). *Air pollution in Asia and the Pacific: Science-based solutions*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org>
- World Health Organization (WHO). (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Yokelson, R. J., Burling, I. R., Gilman, J. B., Warneke, C., Stockwell, C. E., de Gouw, J., Akagi, S. K., Urbanski, S. P., Veres, P., Roberts, J. M., Kuster, W. C., Reardon, J., Griffith, D. W. T., Johnson, T. J., & Hosseini, S. (2008). Emissions from biomass burning in North America. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(13), 3509–3527. <https://doi.org/10.5194/acp-8-3509-2008>
- Zhang, Y., Bocquet, M., Mallet, V., Seigneur, C., & Baklanov, A. (2019). Real-time air quality forecasting: Current status and future directions. *Atmospheric Environment*, 60, 632–655. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.004>
- Zhang, Y., Jacob, D. J., Wang, Y., & Logan, J. A. (2015). Modeling the impact of climate variability on atmospheric pollutants. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(4), 1770–1785. <https://doi.org/10.1002/2014JD022675>

No.	Rol	Descripción
<i>Nota 1: favor de eliminar los corchetes una vez colocado su nombre</i> <i>Nota 2: elimine el todo texto de apoyo que se proporcionó en los asteriscos de cada fila y debajo de cada nombre.</i>		
1	Conceptualización [Conceptualization]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
2	Curación de datos [Data curation]	Alan Joel Servín Prieto, Tania Elizabeth Velasquez Chávez
3	Análisis formal [Formal analysis]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Alan Joel Servín Prieto
5	Investigación [Investigation]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández, Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Juan Manuel Martínez Burrola
6	Metodología [Methodology]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
7	Administración del proyecto [Project administration]	Alan Joel Servín Prieto
8	Recursos [Resources]	Alan Joel Servín Prieto
9	Software [Software]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
10	Supervisión [Supervision]	Tania Elizabeth Velasquez Chávez, Mónica Hernández López
11	Validación [Validation]	Tania Elizabeth Velasquez Chávez, Mónica Hernández López
12	Visualización [Visualization]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Alan Joel Servín Prieto
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Alan Joel Servín Prieto, José María Juárez Hernández, Tania Elizabeth Velásquez Chávez, Mónica Hernández López y Juan Manuel Martínez Burrola