

# Google Earth Engine (GEE) como Herramienta de Procesamiento y Análisis de Datos del Satélite Sentinel-5P

## Google Earth Engine (GEE) as a Tool for Processing and Analyzing Sentinel-5P Satellite Data

Servín-Prieto, A.J.<sup>1</sup>; Velásquez-Chávez, T.E.<sup>2</sup> ✉, Juárez-Hernández, J.M.<sup>3</sup>; Hernández-López, M.<sup>4</sup>; Vásquez-Corral, M.H.<sup>5</sup>

### Datos de Adscripción:

<sup>1</sup> Servín Prieto, Alan Joel  
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davyr38>  
ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>  
alan.sp@itslerdo.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5534-7875>

<sup>2</sup> ✉ Velásquez Chavez, Tania Elizabeth  
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davyr38>  
ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>  
tania.vc@itslerdo.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7788-1786>

<sup>3</sup> Juárez Hernández, José María  
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davyr38>  
ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>  
jose.jh@itslerdo.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5790-651X>

<sup>4</sup> Hernández López, Mónica  
TecNM: Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón, Coahuila. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davyr38>  
monicahlop@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-127X>

<sup>5</sup> Vásquez Corral, Marcial Humberto  
TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Ciudad Lerdo, Durango. México.  
ROR ID: <https://ror.org/00davyr38>  
ROR ID: <https://ror.org/04bjtbt12>  
marcial.vc@itslerdo.edu.mx  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0722-0369>

**Resumen** – El análisis de contaminantes atmosféricos mediante datos satelitales ha cobrado gran relevancia en los estudios ambientales actuales; sin embargo, el manejo y procesamiento de grandes volúmenes de información geoespacial continúa siendo un desafío. En este contexto, *Google Earth Engine* (GEE) se ha consolidado como una plataforma eficaz para el procesamiento de datos en la nube, basada en una arquitectura distribuida que permite el análisis de grandes colecciones de datos mediante programación en lenguaje Python, sin requerimientos de infraestructura computacional local de alto rendimiento. El objetivo de este estudio fue evaluar la aplicabilidad de GEE para el procesamiento y análisis de datos del satélite Sentinel-5P, el cual proporciona información global sobre contaminantes atmosféricos con su sensor TROPOMI. Se implementó un flujo de trabajo que incluyó la selección del área de estudio, filtrado temporal, procesamiento de imágenes y generación de composiciones temporales mediante scripts reproducibles. Los resultados muestran que GEE permite el manejo eficiente de grandes volúmenes

de datos satelitales; el procesamiento de información correspondiente a cuatro años se completó en aproximadamente una semana, evidenciando una optimización significativa en los tiempos de análisis en comparación con métodos tradicionales basados en procesamiento local. Asimismo, la plataforma facilitó el análisis multitemporal y la generación de resultados reproducibles. Estos hallazgos evidencian el potencial de GEE como una herramienta confiable para el análisis de información atmosférica, contribuyendo al monitoreo ambiental y apoyando la toma de decisiones en materia de calidad del aire a diferentes escalas espaciales.

**Palabras Clave** – Calidad del Aire, *Google Earth Engine*, Procesamiento en la nube, Sentinel-5P, Teledetección.

**Abstract** - The analysis of atmospheric pollutants using satellite data has gained significant relevance in current environmental studies; however, the management and processing of large volumes of geospatial data remain a challenge. In this context, *Google Earth Engine* (GEE) has emerged as an effective cloud-based platform, built on a distributed architecture that enables the analysis of large datasets through Python-based programming, without requiring high-performance local computing infrastructure. The aim of this study was to evaluate the applicability of GEE for the processing and analysis of data from the Sentinel-5P, which provides global information on atmospheric pollutants through the TROPOMI sensor. A workflow was implemented including area of interest selection, temporal filtering, image processing, and the generation of temporal composites using reproducible scripts. The results show that GEE enables efficient handling of large volumes of satellite data; the processing of four years of information was completed in approximately one week, demonstrating a significant optimization in analysis time compared to traditional local processing methods. Additionally, the platform facilitated multitemporal analysis and the generation of reproducible results. These findings highlight the potential of GEE as a reliable tool for atmospheric data analysis, supporting environmental monitoring and decision-making related to air quality at different spatial scales.

**Keywords** – Air Quality, *Google Earth Engine*, Cloud-based processing, Remote Sensing, Sentinel-5P.

## I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales y de salud pública, no solo a nivel local o regional, sino también a nivel mundial, debido al incremento sostenido de las emisiones contaminantes derivadas de las actividades industriales, urbanas y agrícolas (*World Health Organization*, 2021). El crecimiento poblacional, la expansión urbana y el aumento del consumo energético han favorecido la liberación de gases y partículas contaminantes que alteran la composición natural de la atmósfera, lo que se traduce en impactos negativos en los ecosistemas, el clima y la salud humana (IPCC, 2021). Entre los efectos más relevantes asociados a la contaminación del aire se encuentran las enfermedades respiratorias y cardiovasculares, la disminución de la calidad ambiental y la contribución significativa al cambio climático (UNEP, 2019).

Entre los contaminantes atmosféricos de mayor importancia se encuentra el monóxido de carbono (CO), un gas incoloro e inodoro producido principalmente por la combustión de combustibles fósiles y biomasa (EPA, 2022). Las principales fuentes de emisión de CO son el transporte vehicular, las actividades industriales, la quema de residuos agrícolas y forestales, así como diversos procesos relacionados con el uso de hidrocarburos (Seinfeld & Pandis, 2016). La exposición prolongada a concentraciones elevadas de CO representa un riesgo importante para la salud humana debido a su capacidad de reducir el transporte de oxígeno en la sangre, lo que afecta principalmente los sistemas respiratorio, cardiovascular y neurológico (EPA, 2022).

Recientemente, diversos estudios han resaltado la importancia de implementar herramientas tecnológicas, como la teledetección, para el monitoreo ambiental y el análisis de contaminantes atmosféricos, debido a su capacidad de proporcionar información continua y de alcance global. Los sensores remotos permiten obtener información espacial y temporal sobre la dispersión de contaminantes, facilitando el análisis de patrones de emisión, transporte y dispersión en la atmósfera (Griffin *et al.*, 2019). Dentro de estos sistemas de monitoreo, destaca el satélite Sentinel-5P, perteneciente al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, que incorpora el sensor TROPOMI (*Tropospheric Monitoring Instrument*), diseñado específicamente para el monitoreo de gases de traza y aerosoles atmosféricos con alta resolución espacial y temporal (Levelt *et al.*, 2018).

Los datos generados por este sensor han sido ampliamente utilizados para el análisis de contaminantes como dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO), permitiendo identificar las tendencias temporales y áreas críticas de contaminación en diferentes regiones del planeta (Eskes *et al.*, 2022). Sin embargo, el procesamiento y análisis de grandes volúmenes de información satelital representan un desafío debido, principalmente, a los requerimientos de infraestructura computacional asociados al manejo de datos geoespaciales.

En este sentido, *Google Earth Engine* se ha consolidado como una de las plataformas de mayor importancia en el procesamiento de este tipo de información, ya que utiliza la infraestructura de la nube. Esta plataforma permite acceder,

procesar y analizar colecciones de datos satelitales mediante algoritmos desarrollados en lenguajes de programación como Python y JavaScript, sin necesidad de infraestructura computacional local de alto rendimiento (Gorelick *et al.*, 2017). Entre sus ventajas destacan la automatización de procesos, el análisis multitemporal y la generación de resultados reproducibles en periodos de tiempo reducidos.

En regiones como la Comarca Lagunera donde la actividad agrícola e industrial son intensas, el monitoreo de emisión de contaminantes resulta de mucha importancia (INEGI, 2020). La región, además, presenta condiciones meteorológicas que propician la acumulación de estos gases, tales como baja velocidad del viento, temperaturas extremas y estabilidad atmosférica en algunas épocas del año (Jacob & Winner, 2009). A pesar de la relevancia ambiental de esta problemática, los estudios que enfatizan el análisis espaciotemporal de gases como el CO mediante la percepción remota siguen siendo limitados. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad de implementar *Google Earth Engine* como herramienta de procesamiento y análisis de datos del satélite Sentinel-5P. Asimismo, se busca demostrar la utilidad del procesamiento en la nube para optimizar el manejo de grandes volúmenes de información y contribuir al monitoreo ambiental y la toma de decisiones en materia de calidad del aire.

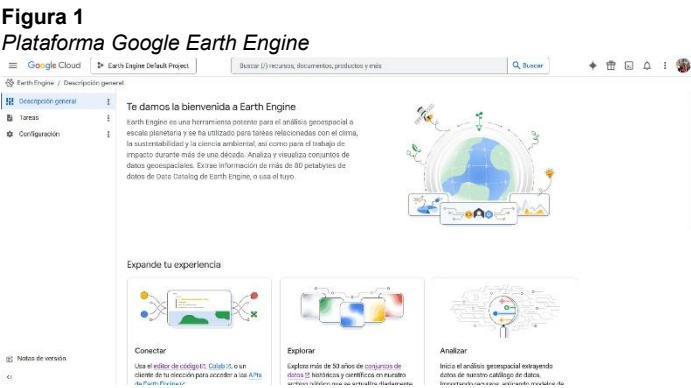
## II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

### 2.1 *Google Earth Engine*

El crecimiento exponencial de los datos satelitales ha generado la necesidad de utilizar plataformas capaces de almacenar, administrar y procesar grandes volúmenes de información geoespacial de manera eficiente. GEE se ha consolidado como una de las herramientas más importantes para el análisis geoespacial basado en la nube, debido a su capacidad de integrar colecciones masivas de datos provenientes de satélites, algoritmos de procesamiento y recursos computacionales distribuidos en un mismo entorno (Gorelick *et al.*, 2017).

*Google Earth Engine* es una plataforma desarrollada por Google que combina un catálogo multitemporal de imágenes de satélite con infraestructura de cómputo en la nube de alta capacidad y rendimiento (Figura 1). La plataforma permite ejecutar procesos complejos de análisis espacial sin requerir equipos locales de alto rendimiento, lo que representa una ventaja significativa frente a metodologías tradicionales basadas en procesamiento local.

Una de las principales fortalezas de GEE es su capacidad para consultar colecciones históricas de imágenes satelitales provenientes de distintas misiones espaciales, incluidas Landsat, MODIS, Sentinel, CHIRPS y ERA5, entre otras (Figura 2). Esta integración facilita el desarrollo de estudios ambientales multitemporales y multiescales mediante procesos automatizados y de fácil replicación.



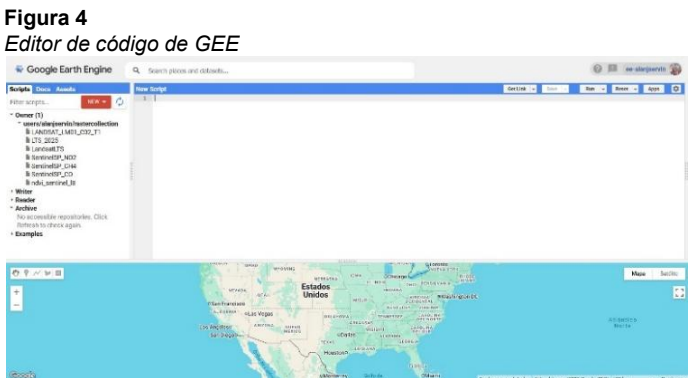
En este estudio, la plataforma GEE fue utilizada como entorno principal para la obtención y procesamiento de datos satelitales de Sentinel-5P, permitiendo realizar análisis espacial y temporal de concentraciones de monóxido de carbono durante el periodo de 2019 a 2023.



## 2.2 Arquitectura y procesamiento en la nube

El funcionamiento de GEE se basa en una arquitectura distribuida que permite ejecutar procesos directamente en servidores remotos. A diferencia de los sistemas de información geográfica convencionales, donde los datos deben ser descargados y procesados de manera local, GEE realiza el procesamiento directamente en la nube, reduciendo significativamente el tiempo de ejecución y el consumo de recursos computacionales. La plataforma utiliza procesamiento paralelo distribuido, lo que

permite trabajar simultáneamente con miles de imágenes satelitales. Este enfoque resulta especialmente útil para estudios atmosféricos multitemporales en los que se requiere analizar una vasta colección de datos (Figura 4).



En esta investigación, el procesamiento de cuatro años de imágenes de Sentinel-5P se completó en cinco días, evidenciando una optimización respecto a metodologías tradicionales basadas en la descarga y el procesamiento local de las imágenes. Por otro lado, la plataforma permitió automatizar tareas respectivas como: filtrado temporal de imágenes, aplicación de filtros de calidad, cálculo de promedios espaciales y temporales, generación de composiciones ráster y exportación automatizada de los resultados. Esta automatización redujo, además, los errores humanos asociados al procesamiento manual y facilitó la reproducibilidad metodológica.

### 2.3 Obtención y preparación de datos satelitales

Para el análisis atmosférico se empleó la colección satelital Sentinel-5P OFFL L3 CO disponible en el catálogo de GEE. Esta colección contiene información sobre la densidad columnar de monóxido de carbono obtenida mediante el sensor TROPOMI. El procedimiento de preparación de datos se muestra en la Figura 5.

**Figura 5**  
Metodología aplicada en la preparación de datos

#### Metodología de Preparación de Datos: Monitoreo de CO (2019–2023)

Este flujo de trabajo describe las etapas sistemáticas necesarias para procesar imágenes satelitales de monóxido de carbono (CO). El proceso abarca desde la definición del área geográfica hasta la síntesis final de datos para el periodo 2019–2023.



This work is licensed under CC BY 4.0.  
To view a copy of this license, visit  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Figura 10**

**Código para exportar el producto a Drive**

```

Sentinel5P.CO
10: exportImage({
11:   name: 'CO',
12:   palette: ['dark', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red'],
13:   // 'CO_Total_1'
14: })
15: // exportImage({
16: //   name: 'CO_Total_1',
17: //   description: 'CO_Total_1_2019_2023',
18: //   folder: 'CO',
19: //   fileNamePrefix: 'CO_Total_1_2019_2023',
20: //   region: geometry,
21: //   scale: 10,
22: //   tileFormat: 'PNG'
23: // })

```

## 2.8 Ventajas de GEE en estudios atmosféricos

Los mapas temáticos permiten identificar las ventajas de *Google Earth Engine* en los estudios de dispersión de contaminantes. Entre las ventajas más destacables están:

1. Procesamiento de grandes volúmenes de datos en tiempo reducido.
2. Acceso inmediato a colecciones satelitales históricas.
3. Automatización de flujos metodológicos.
4. Reproducibilidad de resultados.
5. Integración con el lenguaje de programación Python.
6. Reducción de los requerimientos de infraestructura local.
7. Facilidad para desarrollar análisis multitemporal.

Estas características convierten a GEE en una herramienta altamente eficiente para investigaciones ambientales relacionadas con el monitoreo de contaminantes atmosféricos, el cambio climático y el análisis espacial de contaminantes.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Procesamiento y manejo de información satelital

Uno de los principales resultados obtenidos fue la capacidad de GEE para procesar grandes volúmenes de información proveniente de satélites en tiempos significativamente acortados. Durante esta investigación se analizaron las imágenes correspondientes al periodo de 2019 a 2023 utilizando funciones de automatización para el filtrado, la calidad y la exportación de datos.

El procesamiento multitemporal realizado en GEE permitió completar el análisis de cuatro años de información en cinco días, lo que representó una ventaja considerable respecto a metodologías convencionales basadas en la descarga y el procesamiento de imágenes de manera local. Este resultado se asemeja al reportado por Gorelick et al. (2017), quienes destacan que la arquitectura distribuida de GEE permite optimizar procesos geoespaciales a gran escala mediante la computación paralela.

Asimismo, la plataforma eliminó la necesidad de descargar cada imagen de satélite por separado, reduciendo el consumo de almacenamiento local y simplificando el flujo metodológico de trabajo. Esto resultó particularmente importante considerando el tamaño y la frecuencia de los productos generados por el Sentinel-5P.

### 3.2 Eficiencia de GEE en estudios atmosféricos

El aporte más relevante del presente estudio fue demostrar la eficiencia operativa de GEE para investigaciones de contaminación atmosférica en un espacio de tiempo determinado, entre las principales ventajas identificadas durante el estudio destacan; el acceso inmediato a datos satelitales históricos, el procesamiento en la nube, la automatización de

análisis, la reducción significativa de tiempos en procesamiento, la replicabilidad de la metodología y la integración de lenguajes de programación como Python para el desarrollo de algoritmos personalizados.

La automatización permitió aplicar filtros de calidad, generar composiciones temporales y exportar los productos cartográficos mediante scripts, lo que redujo los errores asociados a los procesos manuales.

Por otro lado, la plataforma de GEE facilitó la integración de análisis basados en técnicas de percepción remota, fortaleciendo la capacidad de monitoreo ambiental a gran escala.

### 3.3 Distribución espacial del CO

El análisis evidenció una distribución heterogénea de las concentraciones de CO en la Comarca Lagunera. Las mayores concentraciones se localizaron principalmente en las zonas urbanas con alta densidad vehicular, en las áreas industriales de las ciudades y en las áreas con alta actividad agrícola asociadas principalmente a la quema de residuos, así como en sectores en la periferia de las manchas urbanas con intensa actividad antropogénica.

Los mapas temáticos generados mostraron patrones espaciales consistentes durante el periodo analizado, con concentraciones más elevadas en municipios con mayor desarrollo urbano e industrial.

Estos resultados coinciden con estudios previos que señalan que el transporte vehicular, las actividades industriales y la quema de biomasa representan la principal fuente de emisiones de CO en regiones semiáridas y en zonas con alta actividad agrícola (Zhang et al., 2019; Yokelson et al., 2008).

La capacidad de visualización de datos de GEE permitió identificar rápidamente zonas críticas de contaminación mediante mapas ráster de alta resolución. La automatización de la generación de composiciones espaciales facilitó, además, la comparación mensual del comportamiento del contaminante.

Las figuras 11, 12, 13, 14 y 15 muestran la dispersión del CO con promedios mensuales, en las que las tonalidades más oscuras representan los sitios con mayor concentración del contaminante.

**Figura 11**

**Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2019**

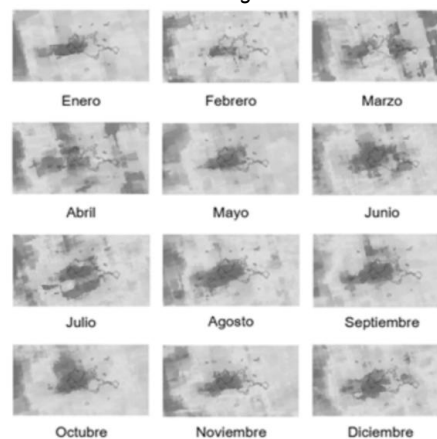


**Figura 12**

Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2020

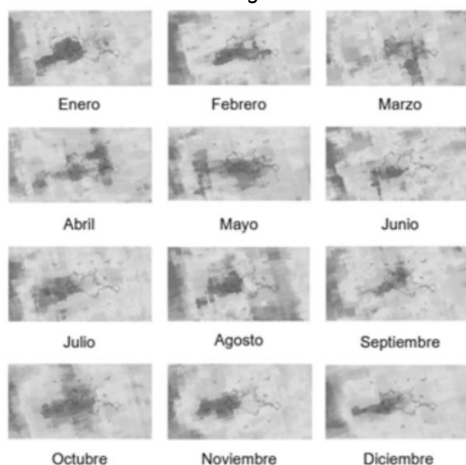


**Figura 13**

Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2021

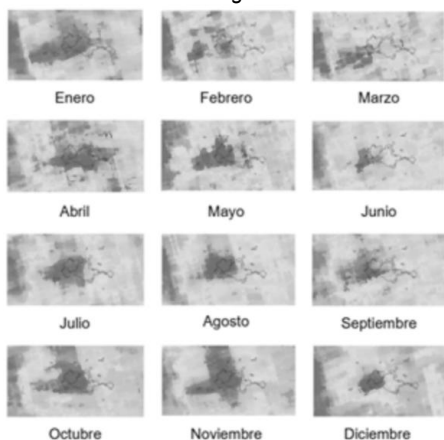


**Figura 14**

Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2022

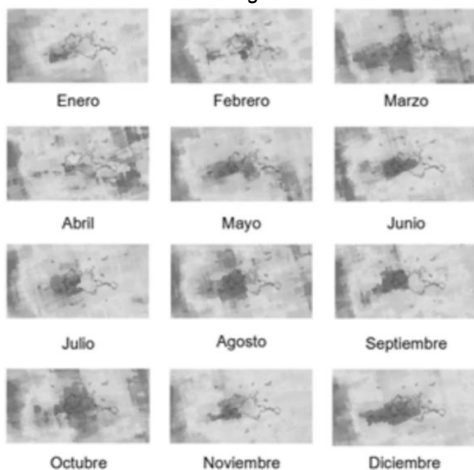
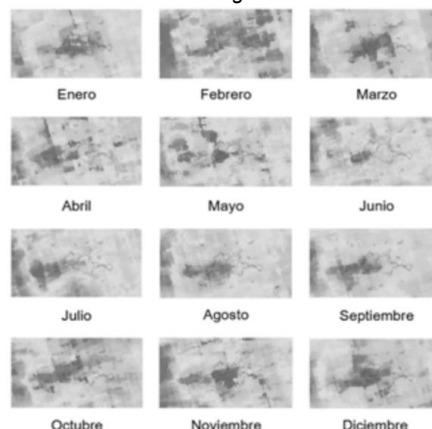


**Figura 15**

Dispersión del CO en la Comarca Lagunera durante el 2023



### 3.4 Implicaciones ambientales y tecnológicas

Los resultados obtenidos evidencian el potencial de GEE como herramienta estratégica para el monitoreo ambiental en regiones con infraestructura limitada para el monitoreo de la calidad del aire.

El uso combinado de esta plataforma de procesamiento en la nube y de la información obtenida mediante sensores remotos, como el satélite Sentinel-5P, representa una alternativa eficiente para la vigilancia ambiental, la identificación de zonas críticas de contaminación, el análisis multitemporal de la dispersión de contaminantes, el apoyo a políticas públicas ambientales y también el desarrollo de sistemas de monitoreo eficientes.

Además, la disponibilidad gratuita de los datos de Sentinel-5P y de herramientas como GEE facilita el desarrollo de proyectos de investigación científica y de aplicaciones ambientales en países en desarrollo, contribuyendo al fortalecimiento de las capacidades tecnológicas para el monitoreo de la calidad del aire.

### 3.5 Limitaciones del estudio

A pesar de los resultados obtenidos, es importante considerar algunas limitaciones asociadas al uso de datos satelitales. La resolución espacial de los productos de Sentinel-5P puede limitar la identificación detallada de fuentes puntuales de contaminación a escala urbana. Asimismo, es importante señalar que se depende completamente de factores climáticos, como la nubosidad y los aerosoles, así como de errores instrumentales que pueden introducir incertidumbre en las estimaciones de la concentración de CO.

Por otra parte, aunque *Google Earth Engine* cuenta con gran capacidad de procesamiento, algunas operaciones complejas pueden verse comprometidas por restricciones computacionales internas de la plataforma, en particular al trabajar con series temporales extensas y múltiples variables simultáneamente. Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda complementar futuras investigaciones con datos técnicamente sustentados, como, por ejemplo, la validación con información meteorológica de la región, contar con estaciones terrestres de monitoreo, obtener modelos de dispersión atmosférica y trabajar con técnicas de validación estadística.

Con lo anterior, estas herramientas permitirán fortalecer la precisión y la validación de los resultados obtenidos mediante técnicas de percepción remota.

#### IV. CONCLUSIONES

La realización de este estudio demostró la aplicabilidad de *Google Earth Engine* para el procesamiento y análisis de datos obtenidos mediante sensores remotos, con enfoque en el monitoreo de variables atmosféricas a gran escala, como el Sentinel-5P.

Los resultados presentados evidencian que la plataforma permite el manejo de manera eficiente de grandes volúmenes de información mediante su procesamiento en la nube sin comprometer la infraestructura local del usuario, además, optimiza de manera significativa los tiempos de análisis y facilita la automatización de procedimientos mediante scripts que pueden ser reproducibles.

El análisis realizado en la Comarca Lagunera, en el período 2019-2023, permitió identificar zonas y períodos con mayores concentraciones de CO, asociadas principalmente a actividades humanas, industriales y agrícolas. También se puede concluir una influencia importante de las condiciones meteorológicas sobre la acumulación del contaminante.

El uso combinado de los datos de Sentinel-5P y GEE representa una alternativa confiable y eficiente para el monitoreo atmosférico de la región, especialmente cuando la infraestructura de monitoreo terrestre es limitada.

#### V. AGRADECIMIENTOS

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

También reconocemos a la Agencia Espacial Europea (ESA) y a la plataforma *Google Earth Engine* por proporcionar acceso libre a los datos de satélite y a las herramientas de procesamiento utilizadas para la realización de este estudio.

#### VI. REFERENCIAS

- Caselli, M. (2020). *Air pollution and climate change*. Springer.
- Environmental Protection Agency. (2022). *Carbon monoxide's impact on indoor air quality* [Página web]. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/carbon-monoxides-impact-indoor-air-quality>
- Eskes, H., van Geffen, J., Sneep, M. y Apituley, A. (2022). *Sentinel-5P TROPOMI carbon monoxide level 2 product user manual* [Archivo PDF]. European Space Agency. <https://sentinels.copernicus.eu>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. y Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Griffin, D., McLinden, C. A., Racine, J., Moran, M. D., Zhao, X., Pavlovic, R., ... Eskes, H. (2019). High-resolution mapping of carbon monoxide with TROPOMI: First results and applications. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(10), 5507–5518. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5507-2019>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de población y vivienda 2020* [Página web]. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Jacob, D. J. y 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., Mälkki, A., Visser, H., de Vries, J., ... Veefkind, J. P. (2018). The Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1), 21–45. <https://doi.org/10.5194/amt-11-21-2018>
- Seinfeld, J. H. y Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3.ª ed.). Wiley.
- United Nations Environment Programme. (2019). *Air pollution in Asia and the Pacific: Science-based solutions*. United Nations Environment Programme.
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines* [Página web]. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Yokelson, R. J., Crounse, J. D., DeCarlo, P. F., Karl, T., Urbanski, S., Atlas, E., ... Wennberg, P. O. (2008). Emissions from biomass burning in Mexico. *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. y Baklanov, A. (2015). Real-time air quality forecasting, part I: History, techniques, and current status. *Atmospheric Environment*, 60, 632–655. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.031>
- Zhang, Z., Streets, D. G., Carmichael, G. R., He, K. y Huo, H. (2019). Satellite observations of carbon monoxide emissions and transport. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111301. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111301>

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