

Artículo de Investigación

Análisis geoespacial de las emisiones de CO y NO₂ según el uso de suelo en El Oro, Ecuador

Geospatial analysis of the CO and NO₂ emissions with remote sensing by land use in El Oro, Ecuador

Angie Mishell Belduma Narvaez¹, Tito David Serrano Guartatanga¹,

Jaime Enrique Maza Maza¹

¹Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 070205; abelduma4@utmachala.edu.ec; jemaza@utmachala.edu.ec

*Correspondencia: tserrano2@utmachala.edu.ec

Citación: Belduma, A.; Serrano, T. & Maza, J., (2025). Análisis geoespacial de las emisiones de CO y NO₂ según el uso de suelo en El Oro, Ecuador. *Novasinerugia*. 8(2). 72-91.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.16.04>

Recibido: 19 marzo 2025

Aceptado: 13 mayo 2025

Publicado: 02 julio 2025

Novasinerugia

ISSN: 2631-2654

Resumen: La presente investigación tiene por objetivo analizar las emisiones de monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) en la provincia de El Oro, Ecuador, mediante su cuantificación y mapeo geoespacial, con el fin de identificar los patrones de distribución espacial asociados al uso del suelo. Para ello, se implementaron imágenes del satélite Sentinel-5P TROPOMI y la plataforma Google Earth Engine (GEE), complementando el análisis con herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG), Microsoft Excel y el software estadístico RStudio, mediante el cual se generaron diagramas de barras para representar la variabilidad de las concentraciones. Los resultados muestran que los cantones de Machala, Pasaje y El Guabo presentan las mayores concentraciones promedio de estos gases (5.20 x10⁻⁵ mol/m²). Según el tipo de cobertura, se observó que en zonas antrópicas predomina la acumulación de NO₂, especialmente en Arenillas, Marcabelí y Las Lajas, mientras que en áreas de cobertura boscosa se registra una mayor concentración de CO. Durante el periodo de pandemia, las emisiones de ambos contaminantes disminuyeron significativamente; sin embargo, esta reducción fue temporal, ya que el periodo posterior se registró un repunte. Se concluye que la cobertura antrópica es un factor determinante en el aumento de las emisiones, mientras que la vegetación arbustiva y herbácea contribuye a su reducción, siendo además el comercio y el tránsito vehicular factores adicionales que influyen en la distribución espacial de estos gases.

Palabras clave: Análisis Geoespacial, Contaminación Atmosférica, Emisiones de CO, Emisiones de NO₂, Google Earth Engine, Sentinel 5-P.

Abstract: *This research aims to analyze carbon monoxide (CO) and nitrogen dioxide (NO₂) emissions in the province of El Oro, Ecuador, through their quantification and geospatial mapping to identify spatial distribution patterns associated with land use. To achieve this, Sentinel-5P TROPOMI satellite imagery and the Google Earth Engine (GEE) platform were used, complemented by Geographic Information System (GIS) tools, Microsoft Excel, and the statistical software RStudio, which was used to generate bar charts representing the variability of concentrations. The results show that the cantons of Machala, Pasaje, and El Guabo present the highest average concentrations of these gases (5.20 x10⁻⁵ mol/m²). Regarding land cover type, it was observed that NO₂ accumulation is predominant in anthropogenic areas, especially in Arenillas, Marcabelí, and Las Lajas, while CO concentration is higher in forest-covered areas. During the pandemic, emissions of both pollutants significantly decreased; however, this reduction was temporary, as emissions rebounded in the following period. It is concluded that anthropogenic land cover is a determining factor in the increase of emissions, while shrub and herbaceous vegetation contribute to their reduction. Additionally, commerce and vehicular traffic are identified as factors that influence the spatial distribution of these gases.*

Keywords: *Geospatial Analysis, Air Pollution, CO Emissions, NO₂ Emissions, Google Earth Engine, Sentinel-5P.*



Copyright: 2025 derechos otorgados por los autores a Novasinerugia.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

En las últimas décadas, la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) ha aumentado de forma alarmante como resultado directo de las actividades humanas, convirtiéndose en una amenaza significativa para la salud ambiental y pública [1]. Entre los principales GEI y contaminantes atmosféricos se encuentran el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el monóxido de carbono (CO), los cuales contribuyen al calentamiento global e inciden negativamente en la calidad del aire, provocando enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente en zonas densamente pobladas e industrializadas [2].

Tradicionalmente, se ha señalado al transporte y a la industria como las principales fuentes emisoras de NO_2 y CO debido al uso intensivo de combustibles fósiles [3]. No obstante, recientes investigaciones han demostrado que los cambios de uso y cobertura del suelo (como la conversión de áreas naturales a zonas agrícolas, urbanas o industriales) también juegan un rol crucial en la distribución espacial y concentración de estos gases [4]. Estas modificaciones afectan la dinámica atmosférica, alteran la absorción y emisiones de contaminantes, e incluso pueden intensificar los niveles de emisión cuando se relacionan con actividades agrícolas, deforestación o expansión urbana desordenada [5]. Por lo tanto, comprender la relación entre el uso del suelo y la calidad del aire se vuelve indispensable para el manejo ambiental y territorial sostenible.

En este contexto, la aplicación de tecnologías de teledetección satelital ha revolucionado el monitoreo ambiental, ofreciendo datos continuos, confiables y de acceso libre para la evaluación de contaminantes atmosféricos. El satélite Sentinel-5P, equipado con el sensor TROPOMI, permite detectar y cuantificar de manera precisa las concentraciones de NO_2 y de CO a escala global, regional y local [6], [7]. Estos datos, procesados a través de plataformas como GEE, son herramientas clave para analizar patrones espaciales de contaminación del aire, incluso en regiones donde no existen redes terrestres de monitoreo [8].

En Ecuador, aunque existen algunas estaciones de calidad del aire en ciudades como Quito, su cobertura es limitada [9] [10]. En contraste, provincias como El Oro carecen de sistemas robustos de monitoreo atmosférico, a pesar de registrar altos niveles de actividad agrícola (especialmente bananera), urbana y comercial, lo que sugiere la posibilidad de emisiones significativas de contaminantes. Sin embargo, no se han desarrollado estudios que cuantifiquen y analicen espacialmente la distribución de NO_2 y de CO en función del uso del suelo en esta provincia.

En este sentido, la presente investigación busca explicar cómo se relacionan las concentraciones espaciales de NO_2 y de CO con los distintos tipos de uso del suelo en la provincia de El Oro, Ecuador. Para ello, se plantea el análisis de las emisiones de NO_2 y CO mediante su cuantificación y mapeo geoespacial utilizando datos del satélite Sentinel-5P TROPOMI y la plataforma GEE, con el fin de identificar patrones de distribución asociados a diferentes coberturas de suelo.

Esta investigación aporta una perspectiva novedosa al integrar herramientas de teledetección y SIG en la comprensión de la calidad del aire en una provincia donde la presión sobre el territorio es elevada, pero el acceso a datos es limitado. Asimismo, busca

generar insumos técnicos para la toma de decisiones ambientales y urbanas basadas en evidencia espacialmente explícita.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

La provincia de El Oro, ubicada en el suroeste del Ecuador, constituye el área de estudio (Figura 1). Tiene una extensión aproximada de 5 767 km² y presenta un gradiente altitudinal que va desde los 0.5 hasta los 3900 msnm. Esta variabilidad topográfica, junto con la influencia de diversas ecorregiones, da lugar a una alta heterogeneidad ambiental, con presencia de aproximadamente 15 sistemas ecológicos diferenciados [11].

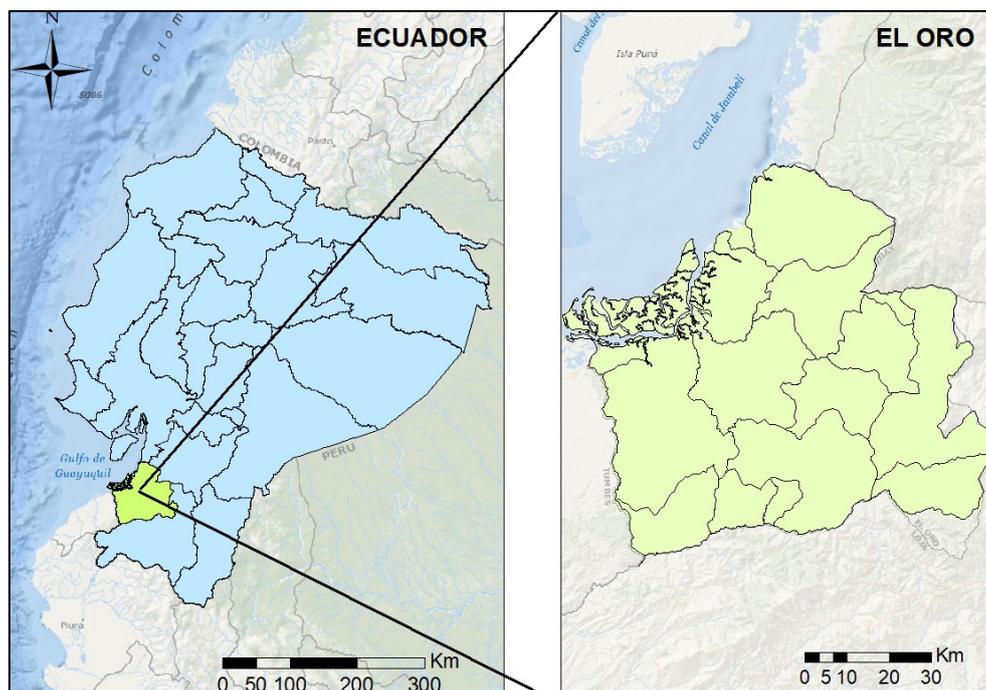


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio

Administrativamente, El Oro se divide en 14 cantones, entre ellos Machala (capital provincial), Huaquillas, Pasaje y Zaruma. La provincia mantiene una fuerte dinámica comercial, agrícola y urbana, siendo el cultivo de banano una de sus principales actividades económicas. Estas características, junto con su proximidad a la frontera con Perú, han impulsado un desarrollo acelerado que también ha generado presiones ambientales significativas.

La actividad antrópica asociada al transporte, comercio y expansión urbana incide directamente en la calidad del aire, especialmente en cantones costeros como Machala, donde las condiciones cálidas y secas favorecen una mayor concentración de contaminantes [12]. En contraste los cantones andinos como Zaruma o Piñas con climas húmedos y lluvias frecuentes, presentan una menor acumulación de gases, aunque factores topográficos pueden limitar la dispersión vertical [13].

2.2. Recopilación y procesamiento de datos

La tabla 1 detalla la información georreferenciada empleada en esta investigación. Los mapas de coberturas y uso del suelo fueron obtenidos directamente del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE), los cuales fueron clasificados en seis categorías conforme a las directrices del IPCC. Para el presente análisis se seleccionaron cuatro clases principales: bosque, tierra agropecuaria, vegetación arbustiva y herbácea, y zona antrópica.

Las capas fueron reproyectadas al sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 17S, y preparadas para su integración con los productos satelitales ráster. En este proceso se respetó la resolución espacial nativa de los datos de menor detalla (más baja resolución), evitando la reasignación a una resolución artificialmente más alta a fin de preservar la integridad de los datos, en concordancia con lo recomendado por [14].

Las concentraciones de NO₂ y de CO fueron obtenidas desde la plataforma GEE, a través de scripts de codificación que permitieron filtrar los productos satelitales Sentinel-5P. Finalmente, mediante el software ArcMap se integraron los datos de contaminación con las coberturas de suelo, lo que permitió construir mapas temáticos y generar una base de datos apta para el análisis espacial temporal.

Tabla 1: Información geoespacial del área de estudio

Insumos cartográficos	Fuente	Año	Formatos
Cobertura y uso de la tierra	MAATE ¹⁵	2018-2020-2022	Vectorial
Zona Urbana del Ecuador (Cantones)	IEDG ¹⁶	2015	Vectorial
Datos de emisión de Monóxido de Carbono	Google Earth Engine ¹⁷	2018-2020-2022	Ráster
Datos de emisión de Dióxido de Nitrógeno	Google Earth Engine ¹⁷	2018-2020-2022	Ráster

Fuente: [15], [16], [17]

2.3. Enfoque metodológico

El presente estudio aplicó una metodología sistemática basada en el análisis de datos geoespaciales para determinar las concentraciones de emisiones de NO₂ y CO en la provincia de El Oro durante los años 2018, 2020 y 2022. En la primera fase, se utilizó información satelital del sensor TROPOMI, integrado en el satélite Sentinel 5-P. A través de la plataforma GEE, se aplicaron filtros temporales y espaciales para seleccionar los conjuntos de datos COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_NO2 y COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_CO, utilizando las variables tropospheric_NO2_column_number_density y tropospheric_CO_column_number_density. Se delimitaron espacialmente los datos a los límites provinciales y temporales de interés, generando promedios mensuales y anuales, se exportaron en formato CSV y GeoTIFF para su posterior análisis.

Posteriormente, mediante el software ArcMap, se elaboraron mapas de distribución espacial de contaminantes para cada año, en coordenadas geográficas WGS84, los cuales permitieron validar visualmente la concentración y dispersión espacial de NO₂ y CO en la provincia. Paralelamente, se empleó el lenguaje de programación R dentro de la plataforma RStudio para procesar y analizar estadísticamente los valores extraídos. Se organizaron los datos en

tablas con valores mínimos, máximos y promedios anuales para cada cantón y para cada categoría de uso y cobertura de suelo, conforme a la clasificación del IPCC.

En cuanto a la normalización por área, esta se llevó a cabo mediante un análisis cruzado entre las concentraciones de contaminantes y las coberturas de suelo, lo cual permitió estandarizar las unidades de análisis independientemente del tamaño territorial de los cantones. Esta clasificación fue clave para evitar sesgos que podrían surgir por diferencias en extensión geográfica, permitiendo así realizar comparaciones más justas y precisas entre áreas con características similares. Al categorizar los datos por tiempo de cobertura (urbana, agrícola, forestal, entre otras), se garantizó una homogeneidad analítica que funcionó como forma indirecta de normalización.

Finalmente, se incorporó un análisis espacial cruzado entre las concentraciones promedio de contaminantes y las distintas coberturas de suelo, con el objetivo de identificar patrones de distribución y posibles fuentes asociadas a las actividades antrópicas. La metodología utilizada se presenta en un diagrama de flujo (Figura 2).

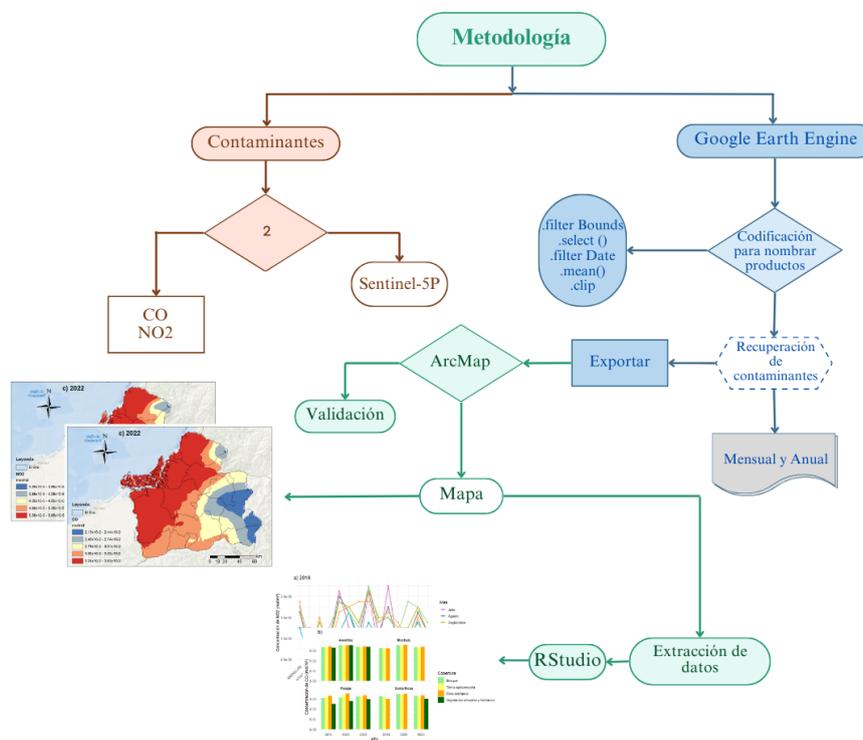


Figura 2. Flujograma de la metodología del proceso de investigación

3. Resultados

3.1. Distribución espacial de cobertura y uso del suelo en la provincia de El Oro (2018, 2020, 2022)

La caracterización del territorio de la provincia de El Oro, según la cobertura y uso del suelo permitió identificar la predominancia de ciertas coberturas sobre otras en los años 2018, 2020 y 2022. Las fig. 3, 4 y 5 representan cartográficamente la distribución espacial de las coberturas del suelo clasificadas conforme a las categorías del IPCC, mientras que la tabla 2 resumen sus respectivas superficies y porcentajes por año.

Se observa que la tierra agropecuaria representa consistentemente la mayor extensión territorial, superando el 70% del área provincial en los tres años analizados, con un ligero incremento del 70.97% en 2018 al 73.45% en 2022. Esta tendencia podría estar asociada al avance de las actividades agrícolas intensivas en detrimento de otras coberturas naturales.

En contraste, el bosque muestra una disminución progresiva, pasando de 22.39% (118,477 ha) en 2018 a 19.83% (104,480 ha) en 2022, lo cual sugiere un proceso de transformación del paisaje posiblemente vinculado al cambio de uso de suelo. Las coberturas de vegetación arbustiva y herbácea se mantuvieron relativamente estables, alrededor del 4.6% del total. Por su parte, las zonas antrópicas (urbanas e infraestructura) registran una leve pero sostenida expansión, desde el 2.04% en 2018 al 2.10% en 2022.

Estos resultados permiten establecer un marco espacial de referencia clave para el análisis posterior de las concentraciones de contaminantes atmosféricos, ya que la distribución de las coberturas del suelo influye directamente en los patrones de emisión, dispersión y acumulación de gases como el NO₂ y CO.

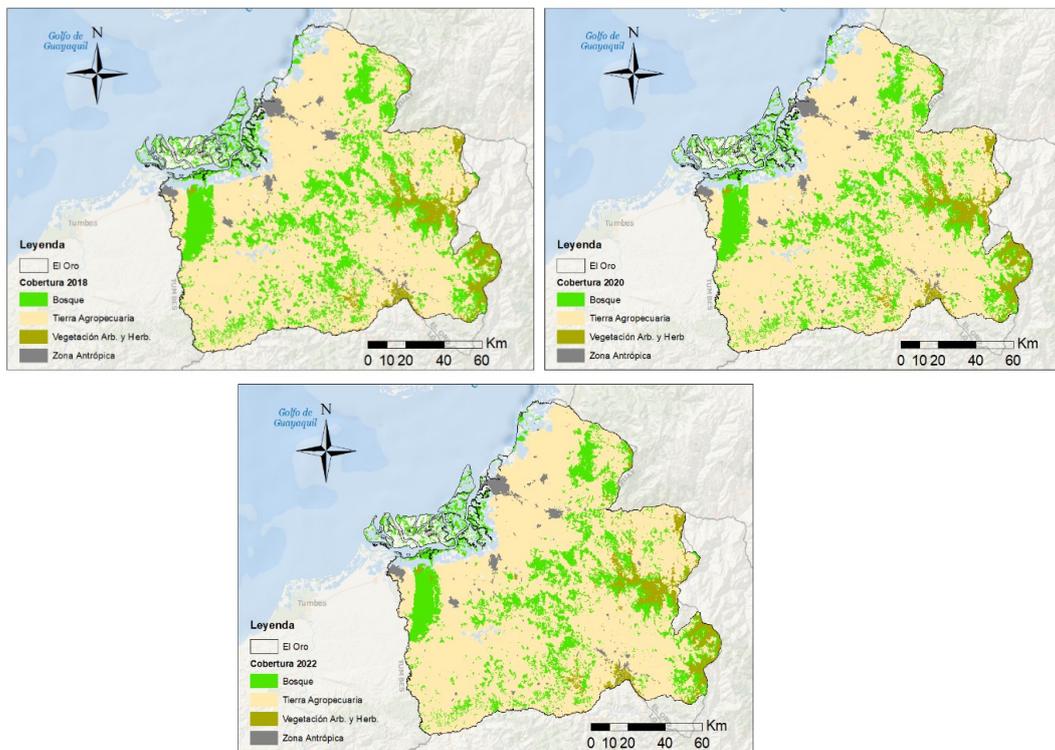


Figura 3. Distribución espacial de cobertura y uso del suelo en la provincia de El Oro (2018, 2020, 2022)

Tabla 2. Superficies y porcentajes de cobertura por año

Cobertura	2018	%	2020	%	2022	%
Bosque	118,477.0	22.39	109,413.0	20.82	104,480.0	19.83
Vegetación Arb Y Herb	24,301.8	4.59	23,997.2	4.57	24,358.3	4.62
Tierra Agropecuaria	375,458.0	70.97	381,369.0	72.57	386,965.0	73.45
Zona Antrópica	10,811.4	2.04	10,726.2	2.04	11,056.7	2.10

3.2. Concentración de NO₂

Los mapas de concentración de NO₂ revelan una distribución espacial persistente con máximos localizados en el norte y noroeste de El Oro, particularmente en los cantones de Machala, Santa Rosa y Pasaje. En 2018, estas zonas registraron los valores más altos (5.36×10^{-5} – 5.85×10^{-5} mol/m²), mientras que el sur y sureste presentaron las concentraciones más bajas (3.35×10^{-5} – 4.35×10^{-5} mol/m²).

En 2020, se observa una leve disminución generalizada de NO₂, con un retroceso de las áreas de alta concentración, coincidente con la reducción de movilidad durante la pandemia. En contraste, 2022 muestra una recuperación de los niveles previos, especialmente en la zona norte, sin superar los valores de 2018.

Los valores más bajos se mantienen en zonas rurales y forestales del sur y oriente de la provincia, evidenciando la relación entre baja densidad urbana y menores emisiones. En conjunto, el patrón espacial se mantiene estable, con variaciones moderadas atribuibles a factores externos como la pandemia y la reactivación económica.

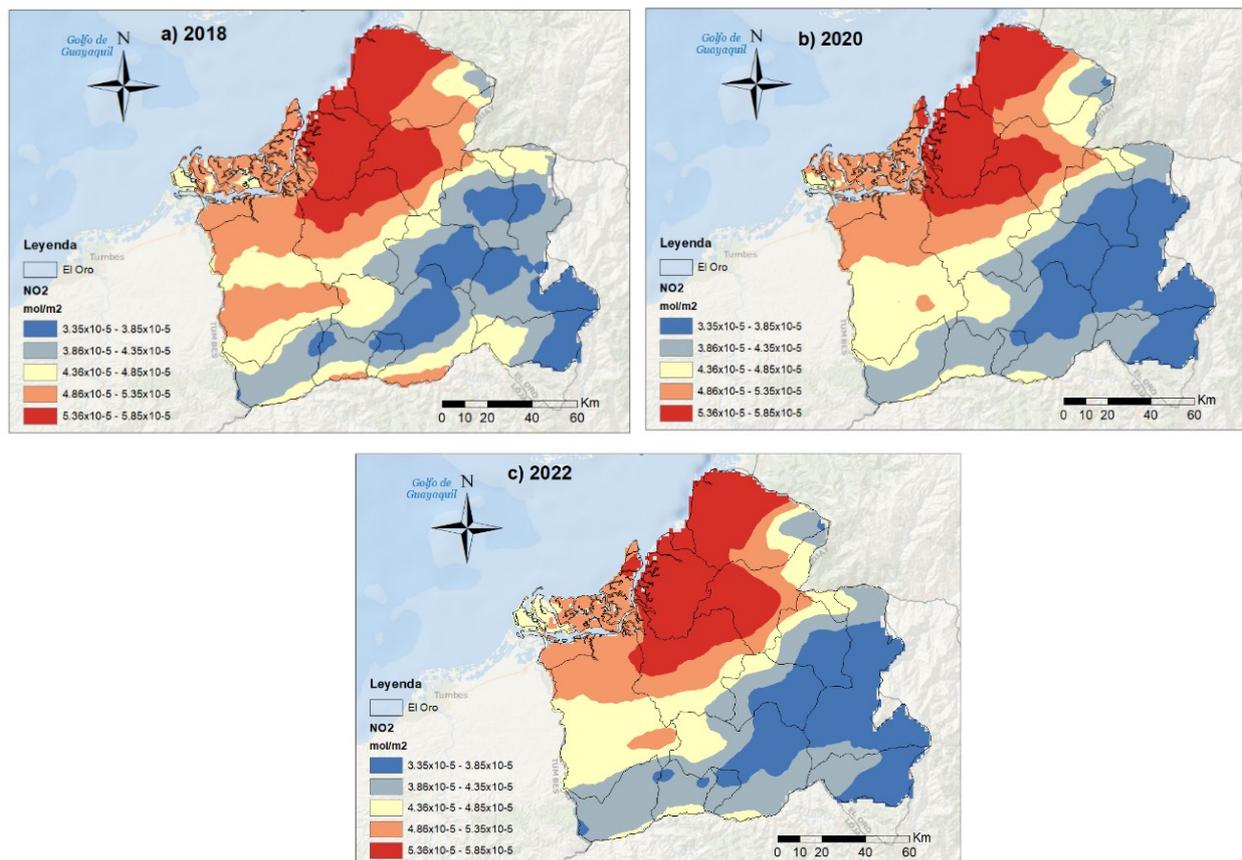


Figura 4. Concentraciones del NO₂ en la provincia de El Oro (2018, 2020 y 2022)

3.3. Análisis de las concentraciones de NO₂ por el tipo de cobertura y uso de suelo

La variación de las concentraciones de NO₂ entre los años 2018 y 2022, diferenciada por la cobertura de uso de suelo en los principales cantones de la provincia de El Oro: Machala, Santa Rosa, Arenillas y Pasaje, revela patrones interesantes (Figura 5). En general,

se observa una tendencia a la estabilidad o un ligero incremento en las concentraciones de NO_2 a lo largo del periodo analizado en la mayoría de coberturas y cantones.

En el cantón Arenillas, las mayores concentraciones de NO_2 se registraron consistentemente en las zonas antrópicas durante todo el periodo, superando los $4 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$. La tierra agropecuaria mostró valores intermedios.

Machala, siendo el cantón más poblado y con mayor actividad económica, exhibió también las concentraciones más elevadas de NO_2 en las zonas antrópicas, alcanzando valores cercanos a los $5 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ en algunos años. Al igual que en Arenillas, las coberturas de bosque y vegetación arbustiva y herbácea mostraron concentraciones más bajas, aunque ligeramente superiores a las observadas en Arenillas en algunos años. La tierra agropecuaria presentó valores similares a estas últimas.

Por otro lado, el cantón Pasaje mostró concentraciones de NO_2 relativamente equiparables entre las coberturas de bosque, tierra agropecuaria y vegetación herbácea, generalmente por debajo de los $4 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$. Sin embargo, al igual que en los otros cantones, la zona antrópica mostró las concentraciones más elevadas, especialmente en los años 2018 y 2022, alcanzando valores cercanos a los $4 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$.

Es decir, el análisis comparativo entre cantones y coberturas de uso de suelo demuestran que las zonas antrópicas son consistentemente las que presentan las mayores concentraciones de NO_2 en los principales cantones de la provincia de El Oro durante el periodo 2018, 2020 y 2022. Las coberturas naturales y agropecuarias tienden a mostrar concentraciones inferiores, con variaciones menores entre ellas. Esta tendencia refuerza la influencia de las actividades humanas urbanas y potencialmente industriales en la emisión y acumulación de NO_2 en la zona.

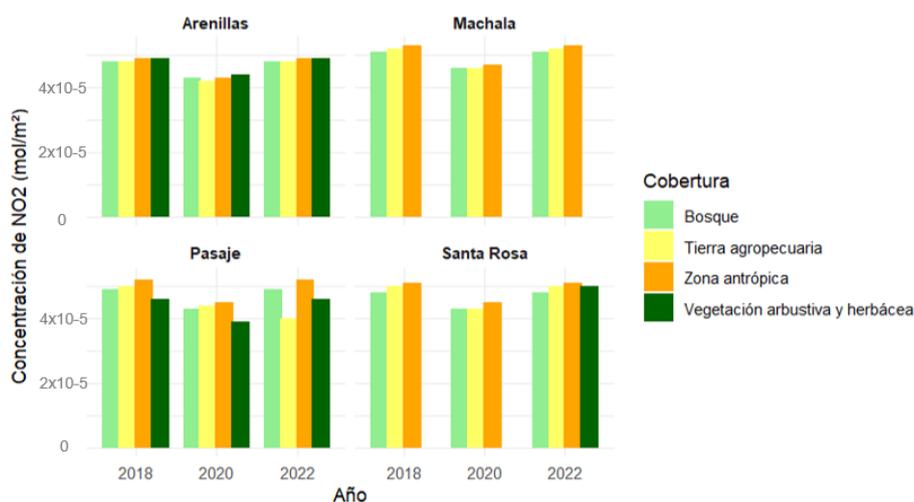


Figura 5. Variación del NO_2 por cobertura en los cantones Arenillas, Machala, Pasaje y Santa Rosa

3.4. Análisis mensual de las concentraciones de NO_2 del año 2018

En el análisis mensual de 2018, se observa una notable variabilidad de las concentraciones de NO_2 entre los cantones y los diferentes meses del segundo semestre del año. Destacan los meses de julio y septiembre como aquellos con picos elevados en varios cantones, especialmente en Machala y Pasaje, cuyas concentraciones superan los 2×10^{-5}

mol/m², notándose un incremento en las emisiones posiblemente relacionado con mayores actividades vehiculares e industriales propias de estos centros urbanos. Por otro lado, cantones como Atahualpa y Chilla presentan niveles menores, por debajo de 1×10^{-5} mol/m², lo cual podría atribuirse a su menor densidad poblacional y limitada presencia de fuentes emisoras como tráfico vehicular o procesos industriales. La variabilidad mensual evidencia una influencia estacional, posiblemente relacionada con patrones climáticos y meteorológicos, con menor dispersión de contaminantes en condiciones de baja ventilación atmosférica en ciertos meses [18].

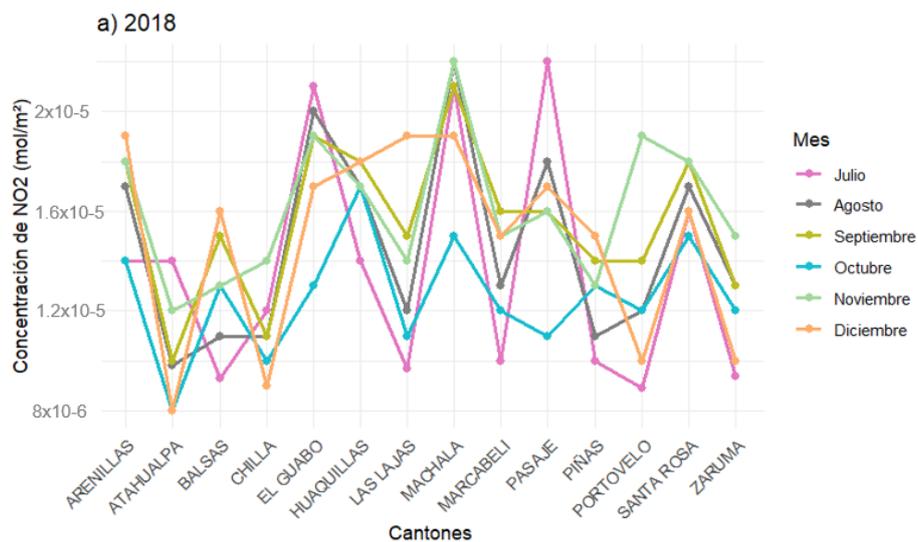


Figura 6. Análisis mensual de las concentraciones del NO₂ en el año 2018

3.5. Análisis mensual de las concentraciones de NO₂ del año 2020

Durante el 2020, año marcado por la pandemia de COVID-19 y las restricciones de movilidad, las concentraciones de NO₂ presentaron una disminución relativa en comparación con 2018, aunque siguen siendo elevadas en cantones como Machala, Marcabelí y El Guabo, donde se superan los 5×10^{-5} mol/m² en los meses de marzo y abril. Esta situación puede parecer contradictoria, pero puede explicarse por la reducción de emisiones de corto plazo durante los confinamientos estrictos seguidos de repuntes posteriores debido al reinicio parcial de las actividades. El patrón más homogéneo a lo largo del año sugiere una menor estabilidad, influenciada por los cambios de dinámica social durante la pandemia [19]. Además, la persistencia de altos niveles en zonas urbanas resalta la dependencia de estas áreas del transporte motorizado como principal fuente emisora de NO₂ [20].

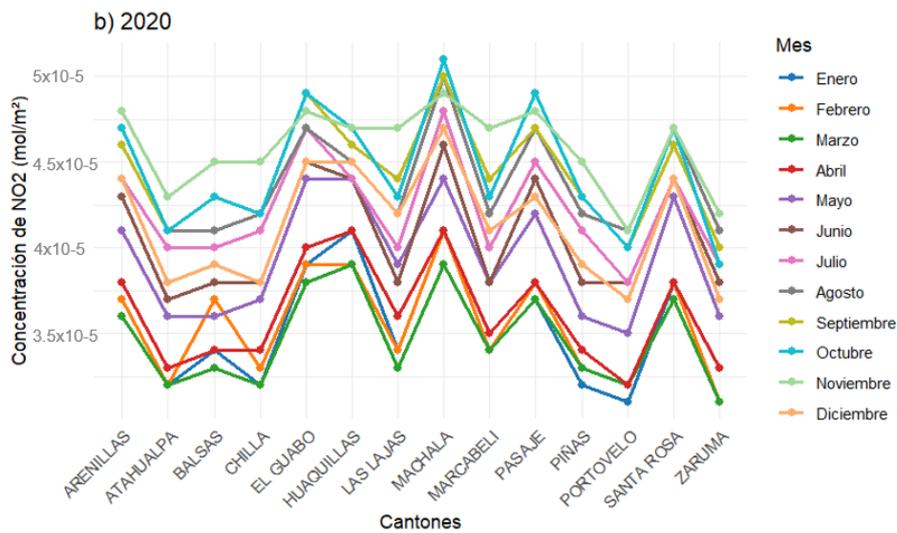


Figura 7. Análisis mensual de las concentraciones del NO₂ en el año 2020

3.6. Análisis mensual de las concentraciones de NO₂ del año 2022

En el año 2022 se observa un incremento generalizado en las concentraciones de NO₂ en la mayoría de los cantones respecto a 2020, alcanzando valores máximos superiores a los 5.5x10⁻⁵ mol/m², principalmente en los meses de julio y septiembre. Nuevamente, los cantones con mayor densidad poblacional y actividad económica como Machala, El Guabo y Pasaje son los que concentran las mayores emisiones. Esta recuperación de niveles elevados puede atribuirse al restablecimiento de las actividades económicas y la movilidad urbana tras la pandemia. El mes de septiembre destaca por presentar picos elevados en al menos cinco cantones, lo que podría estar relacionado con condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de contaminantes o con actividades económicas específicas de este periodo. Cabe destacar que, a pesar de los esfuerzos por mejorar la calidad del aire, la tendencia ascendente en 2022 sugiere la necesidad de políticas públicas más rigurosas para el control de emisiones atmosféricas [21].

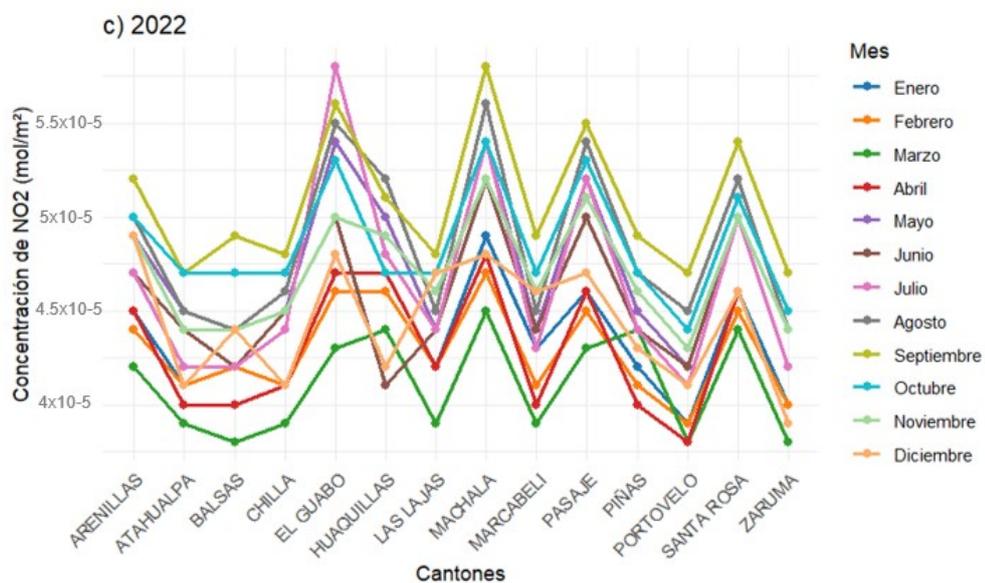


Figura 8. Análisis mensual de las concentraciones del NO₂ en el año 2022

3.7. *Concentración de CO*

El análisis de las concentraciones de CO en la provincia de El Oro entre los años 2018, 2020 y 2022, representados en los mapas de la fig. 9 respectivamente, revela una distribución espacial heterogénea con áreas de mayor y menor concentración que persisten a lo largo del periodo estudiado. En general, se observa una tendencia a concentraciones más elevadas en la zona costera occidental de la provincia, donde se ubican cantones como Machala, Pasaje, Santa Rosa y Arenillas, así como algunas áreas del centro y suroeste.

En el año 2018 las mayores concentraciones de CO, representadas por las tonalidades rojizas (3.24×10^{-2} - 3.63×10^{-2} mol/m²), se localizan principalmente en una franja que abarca la zona costera y se extiende hacia el interior, cubriendo parcialmente los cantones antes mencionados. Hacia el este el sur de la provincia, las concentraciones tienden a disminuir, mostrando tonalidades amarillas y azules (2.13×10^{-2} - 3.01×10^{-2} mol/m²), lo que representa menores emisiones o una mayor dispersión del contaminante en estas áreas.

Para el año 2020 se aprecia una distribución espacial de las concentraciones de CO similar a la de 2018. Las zonas con las concentraciones más altas persisten en la franja costera occidental y su extensión hacia el interior. Sin embargo, se puede notar una ligera disminución generalizada en la intensidad de las concentraciones en algunas áreas, lo que podría estar asociado a los efectos de las restricciones de movilidad y la menos actividad económica durante la pandemia de COVID-19 en ese periodo. Las áreas del este y sur de la provincia continúan presentando las concentraciones más bajas.

En el año 2022 la distribución espacial de las concentraciones de CO muestra un patrón que se asemeja al observado en 2018, con una recuperación de las concentraciones más elevadas en la zona costera occidental y su extensión hacia el interior. Las áreas con las mayores concentraciones (toneladas rojizas) parecen expandirse ligeramente en la comparación con 2020, lo que podría indicar un retorno a los niveles de actividad prepandemia y un consiguiente aumento de las emisiones de CO en estas zonas. Los cantones del este y sur mantienen las concentraciones más bajas.

Al comparar las concentraciones de CO para los años 2018, 2020 y 2022, se evidencia una relativa estabilidad en los patrones de distribución espacial. La zona costera occidental y su área de influencia interior se mantienen como las regiones con las concentraciones más elevadas de CO a lo largo del periodo estudiado. La disminución observada en 2020 sugiere un impacto temporal de la pandemia en la reducción de las emisiones, seguido de una recuperación en 2022 hacia patrones similares a los de 2018. Las áreas del este y sur de la provincia consistentemente presentan concentraciones más bajas de CO. Esta persistencia de las zonas alta de concentración sugiere la presencia de fuentes de emisión relativamente estables en la zona costera, posiblemente relacionadas con actividades urbanas portuarias, industriales o la quema de biomasa agrícola.

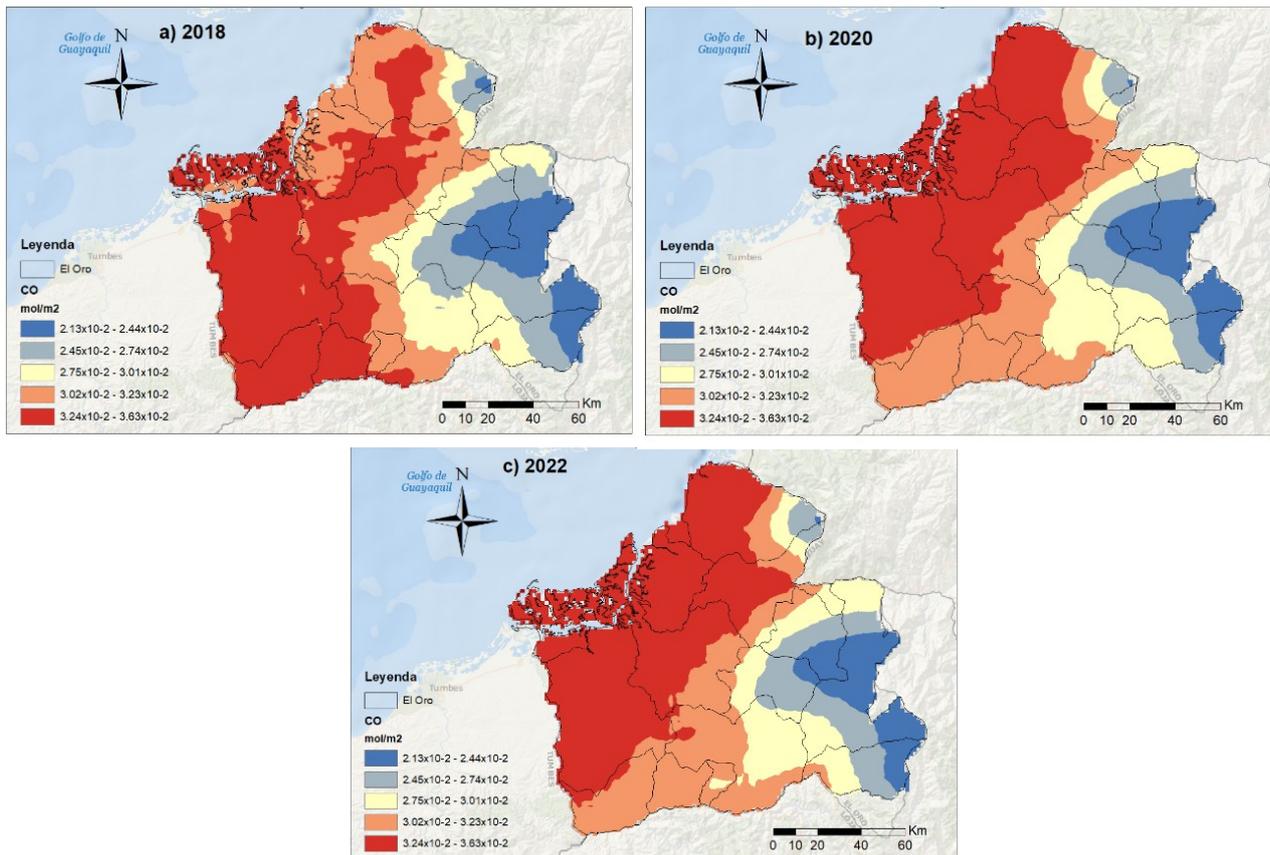


Figura 9. Concentraciones del CO en la provincia de El Oro (2018, 2020 y 2022)

3.8. Análisis de las concentraciones de CO por el tipo de cobertura y uso de suelo

El análisis de las concentraciones de CO en los cantones Arenillas, Machala, Pasaje y Santa Rosa, diferenciado por la cobertura del suelo entre los años 2018, 2020 y 2022 (fig. 10), revela variaciones específicas asociadas a cada tipo de cobertura. En general, se observa una tendencia a la estabilidad de las concentraciones de CO a lo largo del tiempo para cada cobertura dentro de cada cantón, aunque con diferencias notables entre ellas.

En arenillas, las concentraciones de CO fueron relativamente similares entre las diferentes coberturas, con ligeras fluctuaciones anuales. La zona antrópica y la tierra agropecuaria tendieron a presentar valores marginales superiores en algunos años, mientras que el bosque y la vegetación arbustiva y herbácea mostraron concentraciones ligeramente menores.

Machala, al igual que se observó en el análisis general, exhibió consistentemente concentraciones de CO elevadas en todas las coberturas en comparación con otros cantones. La zona antrópica y la tierra agropecuaria presentaron los valores más altos, superando los 3×10^{-2} mol/m² en varios años. Las coberturas de bosque y vegetación arbustiva y herbácea, aunque también elevadas, se mantuvieron ligeramente por debajo de estos valores.

El cantón Pasaje mostró una mayor variabilidad entre las coberturas. Si bien la tierra agropecuaria presentó las concentraciones más altas en algunos años, la zona antrópica también da a conocer valores considerables. La vegetación arbustiva y herbácea mostró las concentraciones más bajas de CO en este cantón durante la mayor parte del periodo analizado.

En Santa Rosa, las concentraciones de CO fueron relativamente homogéneas entre las coberturas de bosque, tierra agropecuaria y zona antrópica, con valores que se mantuvieron en un rango similar a lo largo de los años. La vegetación arbustiva y herbácea, sin embargo, tendió a presentar concentraciones ligeramente inferiores en comparación con las otras coberturas en este cantón.

En contraposición a lo observado con el NO₂, donde la zona antrópica mostraba una clara predominancia en las concentraciones, el CO presenta una distribución más equitativa entre las diferentes coberturas, especialmente con cantones como Arenillas y Santa Rosa. Machala es uno de los cantones que presenta las concentraciones más elevadas de CO en todas las coberturas, lo que refuerza la idea de una mayor actividad general que contribuye a la emisión de este contaminante. La variabilidad observada en Pasaje sugiere una influencia más marcada del tipo específico de uso de suelo en las concentraciones de CO en este cantón.

Esta diferenciación en el comportamiento del CO en relación con la cobertura del suelo, en comparación con el NO₂, subraya la importancia de considerar las fuentes de emisión específicas de cada contenido y su interacción con los diferentes tipos de uso de suelo presentes en la provincia de El Oro.

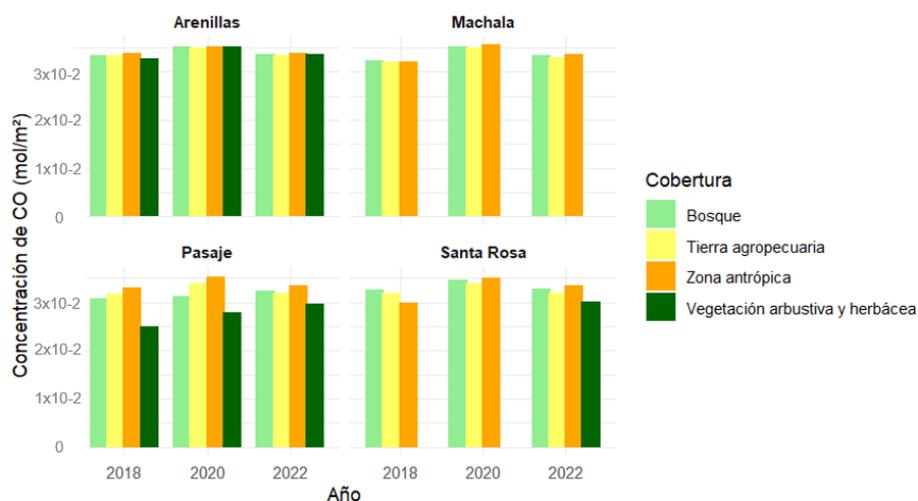


Figura 10. Variación del CO por cobertura en los cantones Arenillas, Machala, Pasaje y Santa Rosa

3.9. Análisis mensual de las concentraciones de CO del año 2018

Durante 2018, se observó una variabilidad moderada de las concentraciones de CO entre los meses analizados. Septiembre presentó los valores más elevados en la mayoría de los cantones, alcanzando picos cercanos a 4.1×10^{-2} mol/m² en cantones como Machala y Santa Rosa. Octubre también mostró concentraciones relativas altas, mientras que julio y diciembre evidenciaron los niveles más bajos, especialmente en cantones como Zaruma y Chilla, con valores mínimos de hasta 2.4×10^{-2} mol/m². Esta distribución sugiere una posible influencia de actividades agrícolas o de quema de los meses secos, particularmente septiembre, como ya ha sido señalado por autores como [22], quienes vinculan estos incrementos con emisiones relacionadas a actividades humanas estacionales.

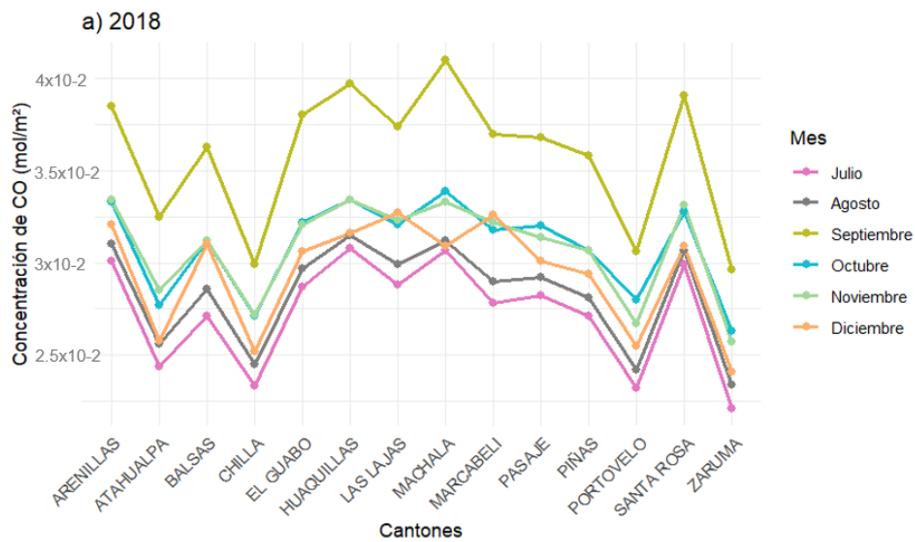


Figura 11. Análisis mensual de las concentraciones del CO en el año 2018

3.10. Análisis mensual de las concentraciones de CO del año 2020

En 2020, las concentraciones de CO fueron más consistentes entre meses, pero con valores generales levemente superiores a los de 2018, destacando nuevamente septiembre como el mes con mayor carga de CO en la atmósfera (hasta 4.3×10^{-2} mol/m² en cantones como Santa Rosa). Octubre y marzo también mostraron concentraciones significativas, lo cual puede estar asociada a una reducción momentánea de restricciones de movilidad por la pandemia de COVID-19, lo que elevó las emisiones. Por otro lado, enero, julio y agosto presentaron valores menores, oscilando entre 2.4×10^{-2} y 3×10^{-2} mol/m². El patrón más uniforme sugiere un impacto atípico por las medidas sanitarias implementadas en ese año, coincidiendo con estudios como [23] el de sobre la influencia de la pandemia en la calidad del aire.

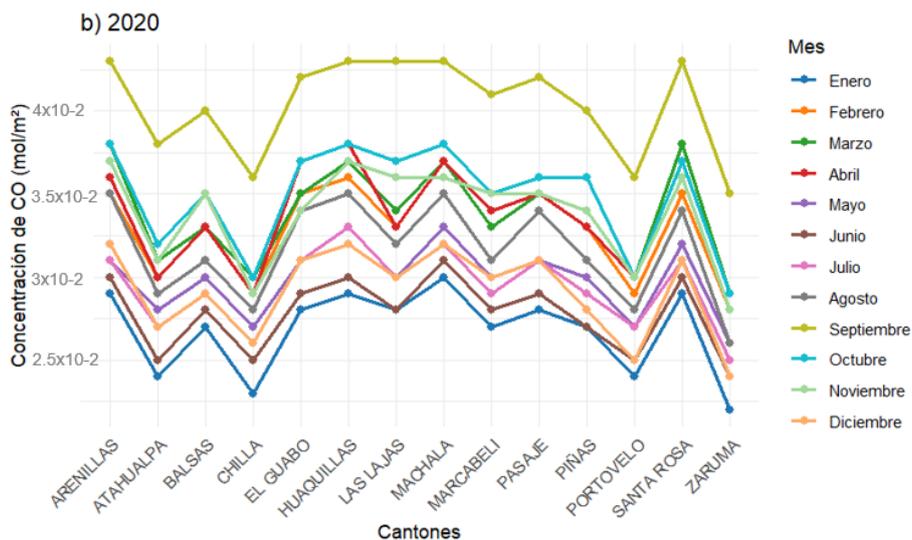


Figura 12. Análisis mensual de las concentraciones del CO en el año 2020

3.11. Análisis mensual de las concentraciones de CO del año 2022

En 2022, se identificó un repunte generalizado en las concentraciones de CO en comparación con 2018 y 2020. Septiembre se mantuvo como el mes de mayor concentración, con valores que alcanzaron hasta 4.5×10^{-2} mol/m² en Machala y Santa Rosa, consolidando una tendencia de incremento en este mes a lo largo de los años. Octubre y marzo también reportaron altos niveles, reflejando posiblemente un retorno a la normalidad en las actividades económicas y de transporte. En cambio, julio y diciembre nuevamente registraron los niveles más bajos, especialmente en Zaruma y Piñas. Este comportamiento sugiere una recuperación de las fuentes emisoras tras la pandemia, reforzando la necesidad de un monitoreo sostenido y políticas de mitigación en zonas urbanas con alta densidad vehicular e industrial.

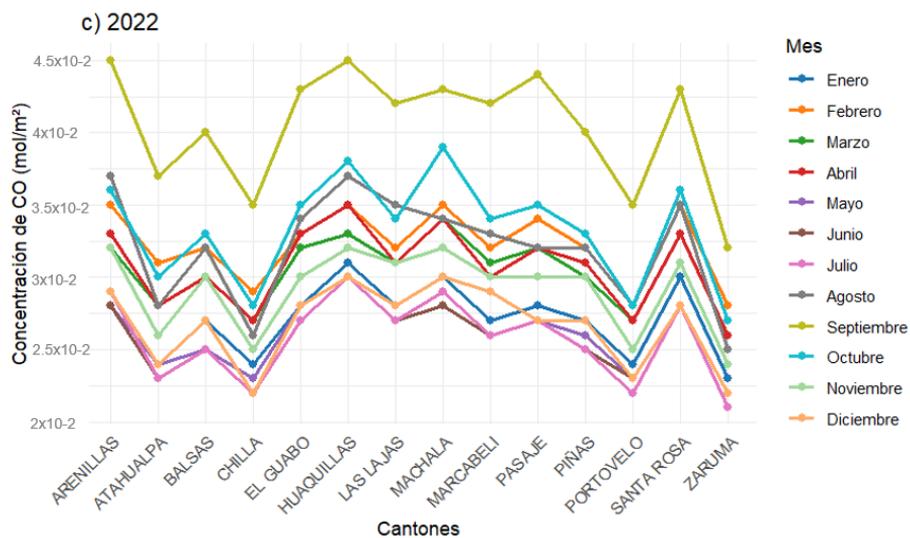


Figura 13. Análisis mensual de las concentraciones del CO en el año 2022

4. Discusión

Este estudio analizó la distribución geoespacial de las emisiones de NO₂ y CO en la provincia de El Oro, Ecuador, y su relación con las coberturas durante el periodo 2018 - 2022. Los resultados revelaron patrones espaciales y temporales distintivos para ambos contaminantes, así como una influencia clara del tipo de cobertura terrestre en sus concentraciones.

En cuanto a la distribución del uso del suelo, se confirmó la predominancia de la tierra agropecuaria como la cobertura más extensa en la provincia, con una tendencia al ligero incremento entre 2018 y 2022. Como lo dice [24] este hallazgo es consistente con las tendencias de expansión agrícola observadas en otras provincias de Ecuador y se encuentra asociada a políticas de desarrollo agrícola y cambios en la demanda del mercado. Por otro lado, la disminución progresiva de la cobertura boscosa plantea preocupaciones sobre la deforestación y sus potenciales efectos en los ciclos biogeoquímicos y la biodiversidad local, un problema también presente en otras provincias costeras del Ecuador, como lo presenta [25] en la provincia de Manabí. La expansión leve pero constante de las zonas antrópicas refleja el crecimiento urbano e infraestructural característico del desarrollo de las provincias

[26]. Este marco de referencia espacial del uso del suelo es fundamental para comprender la distribución de los contaminantes atmosféricos analizados.

El análisis geoespacial de las concentraciones de NO₂ evidenció una persistente zona de alta concentración en el norte y noroeste de la provincia, particularmente en los cantones de Machala, Santa Rosa y Pasaje. Estas zonas presentan una fuerte asociación con áreas de mayor densidad poblacional y actividad económica, donde el tráfico vehicular y las actividades industriales son más intensas [27], [28]. La leve disminución generalizada en 2020, coincidente con las restricciones de movilidad por pandemia, subraya la influencia directa de las actividades antropogénicas en las emisiones de NO₂, tal como lo reportaron estudios a nivel global como el de [29] realizado en Ecuador. La posterior recuperación de los niveles en 2022 refuerza esta interpretación, indicando una resiliencia de las fuentes de emisión tras la relajación de las medidas. En contraste, las zonas rurales y forestales del sur y oriente consistentemente mostraron concentraciones más bajas, lo que apoya la hipótesis de que la baja densidad de fuentes emisoras se traduce a una mejor calidad del aire en estas áreas.

Al analizar las concentraciones de NO₂ en relación con el tipo de cobertura, se observó que las zonas antrópicas presentan los valores más elevados en los principales cantones. Estos resultados son coherentes con estudios como el de [30] donde señala que el transporte y las actividades urbanas son las principales fuentes de emisión de NO₂. Las coberturas naturales y agropecuarias mostraron concentraciones inferiores, aunque con ligeras variaciones entre ellas, influenciadas por la cercanía a vías de comunicación o actividades agrícolas como lo plantea [31] en su estudio realizado en Argentina sobre un análisis multitemporal sobre la dinámica y el impacto de la cobertura y uso de suelo y las emisiones de GEI.

Los resultados de CO, reveló una distribución espacial heterogénea con concentraciones más elevadas en la zona costera occidental y su área de influencia interior a lo largo del periodo estudiado. Esta persistencia presenta fuentes de emisión relativamente estables en estos cantones, posiblemente relacionadas con las actividades presentes como portuarias, industriales, la quema de biomasa agrícola, y prácticas comunes en zonas costeras para la preparación de tierras. La disminución observada en 2020 también apunta a un impacto de la pandemia en la reducción de emisiones, seguido de un alza en 2022, aunque los patrones espaciales se mantuvieron relativamente consistentes. A diferencia del NO₂ el CO mostró una distribución más equitativa entre las diferentes coberturas de uso del suelo, especialmente en cantones como Arenillas y Santa Rosa. Sin embargo, Machala consistentemente presentó concentraciones elevadas en todas las coberturas, lo que indica una mayor carga general de emisión de CO asociada a la intensa actividad del cantón. Los picos mensuales de CO en septiembre durante los tres años analizados están relacionados con las prácticas agrícolas estacionales o las condiciones meteorológicas como se mencionó anteriormente.

Una limitación importante de este estudio radica en la disponibilidad y resolución de los datos de emisiones, que fueron inferidos a partir de modelos satelitales, futuras investigaciones podrían beneficiarse del uso de datos de monitoreo in situ para validar y complementar los hallazgos obtenidos, proporcionando una evaluación más detallada a nivel provincial. Asimismo, sería interesante explorar con mayor detalle la influencia de factores meteorológicos específicos (como la velocidad y dirección del viento, la

temperatura y la precipitación) en la dispersión y acumulación de los contaminantes analizados, utilizando modelos de dispersión atmosférica.

Este estudio geoespacial proporciona una visión clara y sobre todo detallada sobre la distribución de NO₂ y CO en la provincia de El Oro y la relación con la cobertura y uso del suelo. Los resultados destacan la influencia entre las actividades antropogénicas urbanas e industriales en las concentraciones de NO₂ mientras que en el CO presenta una distribución más compleja, influenciada por una variedad de fuentes y usos del suelo. La persistencia de zonas de alta concentración de ambos contaminantes, especialmente en áreas urbanas y la costa, subraya la necesidad de implementar políticas de gestión ambiental y control de emisiones más efectivas para proteger la calidad del aire y la salud públicas en la provincia de El Oro.

5. Conclusiones

El uso de suelo influyó en la distribución de los contaminantes atmosféricos estudiados dentro de la provincia de El Oro. Las zonas urbanas con alta densidad vehicular y las áreas agrícolas intensivas fueron identificadas como los principales focos emisores.

El análisis geoespacial mediante datos satelitales como TROPOMI demostró ser una herramienta eficaz para identificar patrones de contaminación atmosférica en cantones y provincias donde no existen sistemas de monitoreo terrestre, facilitando el seguimiento continuo y la toma de decisiones informadas en la gestión ambiental.

Las coberturas vegetales naturales como bosques secos y vegetación herbácea y arbustiva presentaron menores concentraciones de NO₂ y CO, lo cual reafirma su papel fundamental como reguladores ecológicos y sumideros naturales de contaminantes, destacando la importancia de su conservación.

La expansión urbana no planificada y el uso intensivo de fertilizantes son factores clave que incrementan las emisiones contaminantes en la provincia. Este resultado destaca la urgencia de implementar políticas de movilidad sostenible y buenas prácticas agrícolas con bajo impacto ambiental.

El estudio evidencia la necesidad de una planificación territorial ambientalmente responsable, que contemple el uso de tecnologías geoespaciales y estrategias integradas para reducir la contaminación atmosférica, espacialmente en zonas vulnerables y en crecimiento.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, B.A. y M.J.; metodología, B.A.; software, S.T. y M.J.; validación, S.T.; análisis formal, S.T. y M.J.; investigación, B.A. y S.T.; recursos, B.A. y S.T.; curación de datos, B.A., S.T. y M.J.; redacción—preparación del borrador original, B.A.; redacción—revisión y edición, S.T. y M.J.; visualización, B.A., S.T. y M.J.; supervisión, M.J.; administración del proyecto, B.A., S.T. y M.J. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de Interés

Los autores no reportan conflictos de interés relacionados con esta investigación.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

No se utilizó inteligencia artificial generativa en la preparación de este artículo.

Referencias

- [1] Kumar S, S. Himanshu, y Gupta KK, "Effect of Global Warming on Mankind-A Review," *Int. Res. J. Environment Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 56–59, Nov. 2012, [En línea]. Disponible en: <https://www.isca.me/IJENS/Archive/v1/i4/9.ISCA-IRJEvsS-2012-060.pdf>
- [2] H. Bhattarai, A. P. K. Tai, M. Val Martin, y D. H. Y. Yung, "Impacts of changes in climate, land use, and emissions on global ozone air quality by mid-21st century following selected Shared Socioeconomic Pathways," *Sci. Total Environ.*, vol. 906, p. 167759, ene. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167759>.
- [3] F. Drumm, A. Gerhardt, G. Fernandes, P. Chagas, M. Sucolotti, y P. Kemerich, "POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA PROVENIENTE DA QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DO PETRÓLEO EM VEÍCULOS AUTOMOTORES.," *REGET*, vol. 18, no. 1, abr. 2014, doi: <https://doi.org/10.5902/2236117010537>.
- [4] A. Y. H. Wong y J. Geddes, "On the competing effects of contemporary land management vs. land cover changes on global air quality," *Atmos Chem Phys*, mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.5194/acp-2021-132>.
- [5] N. Ramankutty, A. T. Evan, C. Monfreda, y J. A. Foley, "Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000," *Global Biogeochem Cycles*, vol. 22, no. 1, ene. 2008, doi: <https://doi.org/10.1029/2007GB002952>.
- [6] A. Neckel *et al.*, "Geospatial applicability optics of the TROPOspheric monitoring instrument (TROPOMI) on a global scale: An overview," *Geoscience Frontiers*, vol. 16, no. 2, mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2025.102008>.
- [7] A. Cersosimo, C. Serio, y G. Masiello, "TROPOMI NO2 tropospheric column data: Regridding to 1 km grid-resolution and assessment of their consistency with in situ surface observations," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 14, jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/rs12142212>.
- [8] M. Kazemi Garajeh, G. Laneve, H. Rezaei, M. Sadeghnejad, N. Mohamadzadeh, y B. Salmani, "Monitoring Trends of CO, NO2, SO2, and O3 Pollutants Using Time-Series Sentinel-5 Images Based on Google Earth Engine," *Pollutants*, vol. 3, no. 2, pp. 255–279, may. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/pollutants3020019>.
- [9] V. Díaz Suárez y C. Páez Pérez, "Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras," *ACTA NOVA*, vol. 3, no. 2, pp. 308–322, jun. 2006. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892006000100011
- [10] C. I. Alvarez, A. Teodoro, N. Torres, y V. Vivanco, "Assessment of remote sensing data to model PM10 estimation in cities with a low number of air quality stations: A case of study in Quito, Ecuador," *Environments*, vol. 6, no. 7, p. 85, jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/environments6070085>.
- [11] Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de El Oro, "Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de El Oro," 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.eloro.gob.ec/>
- [12] K. Jara y M. Lojan, "Estudio de la contaminación del aire ambiente por material particulado sedimentable en el casco urbano de la ciudad de Machala provincia de El Oro," tesis de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, 2023.

- [13] Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Piñas, "Modelo De Gestión," Piñas, 2019. [En línea]. Disponible en: https://pinas.gob.ec/images/2021/PDOT/PLAN_DE_DESARROLLO_Y_ORDENAMIENTO_TERRITORIAL_2019-2023/CAPITULO_IX_MODELO_DE_GESTION_PINAS.pdf
- [14] T. Hengl, "Finding the right pixel size," *Comput Geosci*, vol. 32, no. 9, pp. 1283–1298, nov. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>.
- [15] Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2015, "Mapa Interactivo Ambiental," Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. [En línea]. Disponible en: <http://ide.ambiente.gob.ec/mapainteractivo/>.
- [16] Google Earth Engine, "Earth Engine Data Catalog," Google Earth Engine. [En línea]. Disponible en: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets?hl=es-419>.
- [17] Sistema Nacional de Información, "Visor Geográfico IEDG," Infraestructura ecuatoriana de datos Geoespaciales. [En línea]. Disponible en: <https://visorgeografico.sni.gob.ec/>.
- [18] R. Cichowicz, G. Wielgosiński, y W. Fetter, "Dispersion of atmospheric air pollution in summer and winter season," *Environ Monit Assess*, vol. 189, no. 12, nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6319-2>.
- [19] D. Alvim *et al.*, "COVID-19 Pandemic: Impacts on Air Quality during Partial Lockdown in the Metropolitan Area of São Paulo," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 5, feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/rs15051262>.
- [20] E. Felix, A. Schilman, M. Hurtado, J. Texcalac, y H. Riojas, "Revision rápida: contaminación del aire y morbimortalidad por Covid-19," *Salud Publica Mex*, vol. 62, no. 5, pp. 582–589, ago. 2020, doi: <https://doi.org/10.21149/11481>.
- [21] A. Locke, R. Heffernan, G. McDonagh, J. Yassa, y G. Flaherty, "Clearing the Air: a Global Health Perspective on Air Pollution," *Int J Travel Med Glob Health*, vol. 10, no. 2, pp. 46–49, abr. 2022, doi: <https://doi.org/10.34172/ijtmgh.2022.09>.
- [22] L. T. Molina y M. J. Molina, Eds., *Air Quality in the Mexico Megacit*. Springer Netherlands, 2002. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0454-1>.
- [23] R. J. Isaifan, "The dramatic impact of coronavirus outbreak on air quality: Has it saved as much as it has killed so far?," *Global J. Environ. Sci. Manage.*, vol. 6, no. 3, pp. 275–288, jul. 2020. Disponible en: https://www.gjesm.net/article_38731_cf646bbab04352d3ffb6947f139c78ca.pdf
- [24] F. Intriago, "La mecanización agrícola y su impacto en el desarrollo agropecuario del Ecuador," *SATHIRI*, vol. 14, no. 2, p. 289-299, dic. 2019, doi: <https://doi.org/10.32645/13906925.910>.
- [25] A. Montilla, A. Reyes, y E. Agüero, "Análisis de Deforestación en Ecosistemas Boscosos del Refugio de Vida Silvestre Pácoche, Manabí Manta, Ecuador," *Rev Invest*, vol. 41, no. 92, pp. 74–94, dic. 2017. Disponible en: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142017000300005
- [26] E. Benavides-Londo, G. Berrones-Lluguay, L.M. Merino-Cayán, y L. F. Piñas-Piñas, "Asentamientos urbanos informales, falencias y limitación en las zonas de expansión," *VD*, vol. 3, no. especial4, pp. 97–104, dic. 2024, doi: <https://doi.org/10.62574/dk3dga10>.
- [27] Instituto Nacional de Estadística y Censo, 2022, "Presentación de Resultados Nacionales," INEC. [En línea]. Disponible en: <https://www.censoecuador.gob.ec/>
- [28] O. B. Burgo Bencomo, "Planificación Del Desarrollo Provincia El Oro y Cantón Machala: Examen Crítico Desde La Dimensión Cultural," *Conrado*, vol. 18, no. 85, pp. 345–354, abr. 2022. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442022000200345&lng=es&tlng=es
- [29] R. J. Barragan Monrroy, A. M. Macias Mendoza, y B. B. González Ososrio, "Niveles de dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono tras la pandemia de COVID-19 en la provincia de Los Ríos, Ecuador," *Revista de Climatología*, vol. 24, pp. 9-16, jun. 2024, doi: <https://doi.org/10.59427/rcli/2024/v24.09-16>.

- [30] R. Pérez, y W. O. Herrera, "Impacto de los sistemas de transporte público latinoamericanos en la movilidad urbana y en el ambiente," *Publ. Cienc. Tecnol.*, vol. 13, no. 2 pp. 38–53, dic. 2019, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14346.70083>.
- [31] V. Fernández-Maldonado, A. L. Navas, M. P. Fabani, G. Mazza, y R. Rodríguez, "A Multi-Temporal Analysis on the Dynamics of the Impact of Land Use and Land Cover on NO₂ and CO Emissions in Argentina for Sustainable Environmental Management," *Sustainability*, vol. 16, no. 11, p. 4400, may. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16114400>.