Analysis of factors influencing the rate of gas emissions and removals in the land transport sector in Panama

Yohana Banda-Mendoza[1], Manuel Gonzalez-Benalcázar[1], Gustavo Quintero-Barreto[1], Aranzazu Berbey-Alvarez[1]
[1]Universidad Tecnológica de Panamá, República de Panamá, Panamá, República de Panamá,
Yohana.banda@utp.ac.pa, Manuel.gonzalez@utp.ac.pa, gustavo.quintero@utp.ac.pa, Aranzazu.berbey@utp.ac.pa

Abstract– ***This study analyzes the greenhouse gas (GHG) inventory for the land transport sector in Panama from 2000 to 2021, aiming to identify the factors influencing emissions and to develop a predictive model for the next five years using data mining and a quantitative approach. The study incorporates variables such as fuel consumption, fuel prices, and the growth of fossil-fuel-powered vehicles, while also presenting bicycles as a fuel-free alternative. The goal is to provide valuable information to improve climate change mitigation policies in Panama, with a view toward achieving 2030 sustainability objectives.***

Keywords-- Data analysis, climate change, greenhouse gases, data mining, predictive models.

Análisis de los factores que influyen en el índice de emisiones y absorciones de gases en el sector transporte terrestre en Panamá

Yohana Banda-Mendoza[1], Manuel Gonzalez-Benalcázar[1], Gustavo Quintero-Barreto[1], Aranzazu Berbey-Alvarez[1]
[1]Universidad Tecnológica de Panamá, República de Panamá, Panamá, República de Panamá,
Yohana.banda@utp.ac.pa, Manuel.gonzalez@utp.ac.pa, gustavo.quintero@utp.ac.pa, Aranzazu.berbey@utp.ac.pa

Resumen– ***Este estudio busca analizar el inventario de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector transporte terrestre en Panamá desde 2000-2021, con el objetivo de identificar los factores que influyen en la emisión de estos gases, y desarrollar un modelo predictivo para los próximos 5 años, con el apoyo en la minería de datos y un enfoque cuantitativo. El estudio incluye variables como la quema de combustible, el precio del combustible y el crecimiento de los vehículos a base de combustibles fósiles y presentar las bicicletas como alternativa libre de combustible. Se busca proporcionar información valiosa para mejorar las políticas de mitigación del cambio climático en Panamá, con miras a los objetivos de sostenibilidad para 2030.***

Palabras clave-- Análisis de datos, cambio climático, gases de efecto invernadero, minería de datos, modelos predictivos.

I. Introducción

Los gases de efecto invernadero (GEI) son aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro infrarrojo emitida por la superficie de la tierra, la atmósfera y las nubes [1]. La temperatura promedio global es de 15° C, pero sin la presencia de los GEI, esta cifra sería de -18° C, por ello su existencia es vital para la vida humana, animal y vegetal en la tierra, pues los más importantes, que provienen de fuentes no naturales, son los responsables de este aumento de temperatura. Los principales GEI incluyen vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorocarbonos (C_FC), ozono (O_3) y hexafluoruro de azufre (SF_6). Aunque este último sea el que tiene mayor potencial de calentamiento, el dióxido de carbono es el más conocido debido a su contribución al efecto invernadero y su relación directa con las actividades humanas [2].

El cambio climático representa uno de los desafíos más apremiantes de nuestro tiempo, con los gases de efecto invernadero (GEI) actuando como el principal motor del calentamiento global. Gran parte de estas emisiones provienen de actividades humanas, y se estima que las áreas urbanas son responsables de aproximadamente el 70% de estas [3]. En Panamá, la urgencia de abordar este fenómeno es palpable, con un reporte de 4.9 toneladas de dióxido de carbono equivalente por habitante (CO_2e/Hab) en 2013, lo que subraya la necesidad de estrategias de mitigación efectivas [3]. En este contexto, Panamá en su camino hacia un desarrollo sostenible, ha adoptado medidas concretas para la reducción de emisiones [4]. Estas medidas siguen los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) relacionados principalmente con el cuidado del medio ambiente, siendo estos los objetivos 6, 7, 11, 12, 13 y 15 [5]. Este estudio se centra en el inventario de GEI de Panamá desde el año 2000 hasta 2021, con un enfoque particular en el sector transporte terrestre en la Ciudad de Panamá. A través de la minería de datos y la aplicación de modelos predictivos, se examinaron las tendencias históricas y la influencia de factores clave como la quema de combustible fósil, el precio del combustible, el crecimiento del parque vehicular que utilizan combustibles fósiles y las bicicletas como medios de transporte alternativo que no lo utilizan. El objetivo es identificar las variables más significativas que inciden en las emisiones y absorciones de gases, proporcionando una comprensión más profunda de la dinámica de los GEI en el contexto panameño y así poder proponer soluciones a lo que representa una problemática.

II. Marco Teorico

En primer lugar, bajo un panorama energético mundial, se presenta que para el año 2023 el consumo de energía primaria alcanzó los 607.35 EJ, experimentado un aumento de 12.28 EJ con respecto al año 2022, mostrando predominancia los combustibles fósiles con un valor de 504.83 EJ y representando así el 81.5% del total energético. En cuanto a la distribución geográfica se mantienen en lo más alto del ranking las potencias de Estados Unidos y China con porcentajes de 15.2% y 27.6% respectivamente y sumando un total de 42.8% del consumo mundial [2].

En cuanto a emisiones de CO_2, para el 2023 se computaron a nivel mundial 40,305,955 millones de toneladas, 2,996,286 emisiones de óxido nitroso según los millones de toneladas equivalentes de CO_2 y 10,524.614 emisiones de metano según los millones de toneladas equivalentes de CO_2, todas incluyendo el uso del suelo [5].

Panamá, a pesar de su baja contribución global a las emisiones de gases de efecto invernadero, es un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, experimentando un aumento de temperatura de 1 a 2 °C en sus regiones [6].

Esto ha generado una creciente vulnerabilidad en sectores económicos clave, recursos naturales y ecosistemas vitales, afectando la disponibilidad del agua, la agricultura, la salud humana y el desarrollo costero a través de los fenómenos como lluvias prolongadas, sequías intensas y el aumento del nivel del mar. Aunque el país está comprometido con los acuerdos climáticos globales, con proyecciones de futuros aumentos de temperatura que impactarán aún más la agricultura y la salud, sus bosques actúan como importantes sumideros de carbono, y se están implementando esfuerzos para mitigar emisiones y aumentar la absorción de carbono [6].

El compromiso de Panamá con la acción climática ha evolucionado significativamente a lo largo del tiempo, en consonancia con los esfuerzos globales. Iniciando su trayectoria formal en 1995 con la adhesión a la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)[7], el país ha fortalecido su postura al unirse posteriormente al Protocolo de Kioto en 1999 [8] y al Acuerdo de París en 2016 [9]. Paralelamente, Panamá reconoció tempranamente la necesidad de cuantificar sus emisiones, dando los primeros pasos en el año 2000 y presentando su primer inventario de GEI en 2001[10]. Este esfuerzo culminó con la creación del Sistema Sostenible de Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (SSINGEI) mediante el Decreto Ejecutivo en octubre de 2020, asignando al Ministerio de Ambiente, creado en el año 2015, la responsabilidad de su publicación en conjunto con otras entidades[11]. La adopción del Manual de Procedimientos del SSINGEI en 2022 [12] y la publicación del Primer informe bienal de transparencia en 2024 [13], demuestran la consolidación de un sistema robusto y transparente para la estimación de emisiones y absorciones, lo cual, de acuerdo con Zorrilla *et al.,* [14] es fundamental para la formulación de políticas y estrategias climática nacionales.

Por su parte, Berbey-Álvarez, Guevara y Sanz bobi [15], realizaron un estudio sobre la estimación de las externalidades socioambientales con motivo de la introducción de nuevos sistemas de transporte público masivo en la Ciudad de Panamá entre los años 2007, 2010 y 2015. Berbey-Álvarez, Guevara y Sanz bobi [15], concluyeron en la notable mejora por la introducción de sistemas de Metrobús y la línea 1 del metro de Panamá. Sin embargo, Berbey-Álvarez, Guevara y Sanz bobi [15], hacían énfasis en la creciente tendencia del transporte privado tipo taxis en áreas fuera de la zona de influencia de la línea 1 del Metro de Panamá, pero que se pudiera mitigar después de la inauguración de la línea 2 del Metro de Panamá.

También Guevara-Cedeño *et al.,* [16], analizaron el sector transporte en aras del cambio de vehículos de combustión fósil a vehículos de movilidad eléctrica. Guevara-Cedeño *et al.,* [21] proyectó que el 9.3% de las ventas de autos serian eléctricos para el 2050 y habría una disminución de 3.800 toneladas de CO_2 emitidas, pudiendo así reducir la dependencia del petróleo y mitigar los problemas de salud pública causadas por las emisiones contaminantes tales como: alergias, enfermedades cardiovasculares y enfermedades pulmonares etc.

En el 2016, Zorrilla *et al.,* [14] realizó un análisis de los gases de efecto invernadero en el sector transporte en España, donde se identificaron 3 períodos: uno de crecimiento moderado influenciado por la introducción de vehículos por carretera movidos por combustibles fósiles, el período siguiente muestra un crecimiento expansivo, debido a la creciente obtención de energía no renovable y un último período de decrecimiento influenciado por la crisis económica y la instrucción de las energías renovables [14].

Muentes *et al.,* [17] publicó un análisis de los factores determinantes de las emisiones en los sectores de la industria y el transporte en el 2022 en Ecuador, en donde el índice de carbonización, la intensidad energética, la actividad económica y poblacional, permitieron describir las emisiones de CO_2.

En estudios como el de Salgado y Gustavo en 2016[18], reconocieron al sector transporte como un punto clave para combatir el cambio climático y señalan las oportunidades para incorporar las medidas de mitigación, que transformarían el transporte urbano orientándolo a la sostenibilidad[18].

Por su parte, Halcón[19] presentó un análisis de las ventajas de utilizar un sistema de bicicletas eléctricas en Madrid (BiciMAD), con el fin de lograr estimar el ahorro energético y la cantidad de gases que se dejan de emitir a la atmósfera aplicando un modelo predictivo ARIMA para proyectar la evolución futura del impacto de este servicio. En Halcón[19] se tomaron en cuenta los siguiente niveles: cambio climático, contaminación del aire, eficiencia energética en el transporte, gases de efecto invernadero (GEI), reciclaje de componentes, tráfico, combustibles fósiles, energía limpia y contaminación acústica para calificar la movilidad urbana sostenible en la ciudad de Madrid y la perspectiva que aportaba el servicio de bicicletas eléctricas BiciMAD.

En 2017, Gallego [20] realizó un análisis de los datos sobre contaminación atmosférica en Madrid, el estudio incluyó un análisis descriptivo y predicciones a través de un vector auto regresivo para validar si las medidas adoptadas, estaban funcionando. Este estudio mostró cómo el avance de la tecnología en Inteligencia artificial sirvió de apoyo para analizar, comprender y monitorear los resultados de las propuestas de los planes de acción elaborados por organismos para garantizar los objetivos de sostenibilidad.

En 2022, Kshirsagar *et al.,* [21], compararon varios modelos de *Machine learning* tales como: *Random Forest Regressor*, SARIMA, ANN, ARIMA y ARMAX con datos reales de Irlanda y encontraron patrones de comportamiento en el sector transporte, concluyendo en la necesidad de realizar más estudios sobre las fuentes de energía renovables con menores emisiones de carbono y la innovación en baterías más duraderas para autos eléctricos, a fin de lograr la aceptación general de este tipo de vehículos.

En Panamá, Cárdenas y Campos[4], en 2025 llevaron a cabo un estudio acerca del modelado de la reducción de la huella de la carbono en Panamá, específicamente para vehículos y cocinas eléctricas recopilando datos muestrales del uso de vehículos y cocinas en el edificio #1 de la Universidad Tecnológica de Panamá, Campus Dr. Víctor Levi Sasso. En general, el inventario de emisiones y absorciones de los gases de efecto invernadero son datos de gran importancia en la batalla contra el cambio climático, razón por la cual, los países alrededor del mundo hacen esfuerzos en contrarrestar sus efectos.

III. METODOLOGIAS

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, caracterizado por el uso de los datos numéricos y estadísticos para identificar los patrones, tendencias y las relaciones entre variables. Se trata de un estudio de tipo no experimental, ya que la recolección de datos se basa en información histórica existente, considerando como base el inventario de GEI, sin que se realice manipulación alguna de las variables por parte de los investigadores. El diseño de la investigación es de tipo longitudinal, descriptiva-predictiva y correlacional. Esto permitió caracterizar el comportamiento histórico de las emisiones de GEI, la búsqueda de la magnitud y dirección de las relaciones y así mostrar su influencia a través del tiempo.

Debido a que el artículo es una solución relacionada a *Data Mining* y *Machine Learning*, hay que tener en cuenta que algunas preocupaciones desaparecen al momento de planificar, implementar y realizar las pruebas. Por consiguiente, se propuso hacer uso de la metodología CRISP-DM (*Cross Industry Standard Process for Data Mining*), un modelo de proceso de minería de datos que describe una manera en la que los expertos abordan el problema, para el diseño y la implementación del proyecto [22]. Se divide en cinco fases:

1. Fase de comprensión del problema: se comprendió el problema a tratar con el fin de obtener una idea general de lo que se puede conseguir con los datos obtenidos o bien los resultados obtenidos.
2. Fase de comprensión de los datos: se exploró los datos disponibles y se decidió de cual fuente se iban a extraer los datos que se utilizarán posteriormente. Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron datos reales para el entrenamiento del modelo y datos de prueba, luego de haber entrenado el modelo, por consiguiente, el proceso se realizó con ambos conjuntos de datos.
3. Fase de preparación de los datos: los datos recopilados pasaron por un proceso de selección, limpieza, y transformación donde se eliminaron algunos valores que permitieron contar con un conjunto de datos definitivo que fueron relevantes para la investigación.
4. Fase de modelamiento: el conjunto de datos entró a la fase principal de la investigación para el procesado y creación de un modelo. En esta fase, los datos se agruparon, clasificaron y analizaron incorporándolos en las distintas herramientas.
5. Fase de evaluación: dentro de los resultados obtenidos se seleccionaron los más pertinentes, estos pasaron por un proceso en el que se realizó la evaluación e interpretación de los datos, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la fase de comprensión del problema, con el fin de poder entender el resultado obtenido.

Para medir el desempeño del modelo se utilizaron algunas métricas de aprendizaje automático como: MSE (*Mean Squared Error*), RMSE (*Root Mean Square Error*), MAE (*Mean Absolute Error*) y MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*). La elección del RMSE como métrica se justificó debido a su capacidad para cuantificar la discrepancia entre las calificaciones anticipadas y las observadas, proporcionando así una evaluación de la precisión del modelo. La minimización del RMSE persigue la mejora de la capacidad del modelo para lograr una predicción con mayor fidelidad.

A. Fuente y recolección

Como se mencionó en el marco teórico, bajo la dirección del Ministerio de Ambiente y diversas instituciones, se estableció el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), que incluye emisiones de CH_4, N_2O, HFC, PFC, SF_6, NF_3 y CO_2 [3][23]. Por lo tanto, la fuente principal de datos para este estudio es el inventario de GEI de Panamá, así como los informes y bases de datos oficiales de instituciones gubernamentales tales como: el Ministerio de Ambiente, la Contraloría General de la República – INEC, la Autoridad de Tránsito y Transporte Terrestre (ATTT) y la Secretaría de Metas.

Este estudio se concentró en las siguientes variables claves de Panamá: volumen de combustible fósil consumido (2017-2025), el volumen por tipo de combustible, el precio del combustible (2017-2025), las emisiones de CO_2 en el transporte terrestre (2000-2021), la cantidad de vehículos del parque vehicular, la longitud de la red de ciclovías e inversión en infraestructura.

C. *Análisis de datos*

Para este estudio se utilizaron técnicas de análisis de exploratorio de datos, análisis descriptivo y modelos predictivos. El análisis exploratorio de los datos permitió comprender las variables del conjunto de datos, la relación entre ellas y determinar las técnicas adecuadas para su tratamiento.

El análisis descriptivo permitió recolectar y ordenar los datos por medio de gráficas lo que permitió obtener las características más importantes de la recolección de datos y describir las tendencias encontradas. El uso de modelos predictivos permitió analizar la estructura temporal de las emisiones históricas de GEI, identificar tendencias, estacionalidades y los componentes autorregresivos o de media móvil.

D. Herramientas

Se utilizó Microsoft Excel, para organizar y almacenar los datos, Python como software para el cálculo estadístico y ejecución del modelo predictivo, y Power BI como

herramienta de visualización final, para presentar el resumen de los datos y los resultados obtenidos.

IV. Resultados

A. Medidas de tendencia central y variación

Se realizó un análisis de medidas de tendencia central y variación que incluyó las emisiones de CO_2 del transporte terrestre, el precio de la gasolina y del diésel, el parque vehicular, dividido en vehículos motorizados y no motorizados, considerando en estos últimos únicamente las bicicletas, así como las ventas de gasolina y diésel (ver tabla 1). Este enfoque permitió evaluar de manera simultánea la relación entre múltiples variables que influyen en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero, proporcionando una visión integral de los factores que afectan el comportamiento del sector transporte.

Tabla I.
Medidas de tendencia central y variación

Medidas de Tendencia Central	Emisiones CO2 Transporte Terrestre (Ton)	Precio de Gasolina (B/.)	Precio Diesel (B/.)	Parque Vehicular Motorizado Fósil (unidades)	Parque Vehicular No Motorizado (Bicicleta) (unidades)	Venta de Gasolina (miles de galones)	Venta de Diesel (miles de galones)
Valor mínimo	3719,2	0,80	0,70	870525	9829	241639,6	273705,9
Valor máximo	5141,1	0,99	0,87	976833	25443	339421,3	370206,3
Intervalo o rango	1421,9	0,19	0,17	106308	15614	97781,7	96500,3
Media	4670,2	0,87	0,78	920972	18012,8	309967,8	344321,0
Moda	-	0,8	-	-	-	-	-
Mediana	4844,1	0,88	0,76	927412	16548	327795,2	365939,5
Varianza	303189,3	0,006	0,005	1544896275	43736510	1571658072	1677886378
Desviación Estándar	492,5	0,1	0,1	35155,6	5915,2	35458,8	36637,5
Coeficiente de Asimetría	-1,84	0,64	0,48	0,27	0,03	-1,86	-1,88
Coeficiente de Curtosis	3,84	-0,35	-1,31	0,58	-2,08	3,56	3,49
Coeficiente de Variación	10,5	8,1	7,9	3,8	32,8	11,4	10,6
Error Estándar	220,3	0,03	0,03	15722,1	2645,3	15857,7	16384,8

La tabla 1 muestra un análisis estadístico descriptivo para cada una de las siete variables consideradas, siendo estas: las emisiones CO_2, el transporte terrestre (ton), el precio de la gasolina, el precio diésel, las unidades del parque vehicular motorizado con combustibles fósiles, el parque vehicular no motorizado (bicicletas) y la venta de gasolina (miles de galones). Se calcularon las medidas de tendencia central: la media, la mediana y la moda, así como las medidas de dispersión, incluyendo la desviación estándar y el rango intercuartílico, con el objetivo de identificar los patrones, la variabilidad y los posibles valores atípicos en los datos históricos. Estos resultados se presentan en la tabla 1.

El análisis de la desviación estándar mostró que todas las variables presentan una variabilidad de moderada a alta, lo que indicó la presencia de valores relativamente alejados de la media. Asimismo, se observa que únicamente las variables de las emisiones de CO_2 relacionadas con el transporte terrestre junto con las ventas de gasolina y el diésel presentan asimetría negativa cercana al valor de -2 (-1.84, -1.86 y -1.88), mientras que las variables del precio de combustible (diésel y gasolina) y parque vehicular, tanto motorizado como no motorizado (bicicleta), presentan asimetría positiva cercana a cero (0.64, 0.48, 0.27 y 0.03). Esto sugiere que, entre los años 2017 y 2021, los precios de los combustibles y la cantidad de vehículos registrados no mostraron una alta variabilidad, mientras que los valores de consumo de combustible y emisiones de CO_2 presentan una mayor concentración de valores elevados en comparación con los años donde se registraron niveles más bajos. Esta tendencia o comportamiento refleja un patrón preocupante, evidenciando el predominio de la cultura de consumo y su impacto sobre el medio ambiente.

El análisis del Coeficiente de Curtosis indica que las variables de emisiones de CO_2 relacionadas al transporte terrestre junto con las ventas de gasolina y diésel reflejan valores ligeramente superiores a 3, lo que sugiere una distribución mesocúrtica. Esto implica que, aunque predominan los valores altos, la concentración de los valores elevados se comportan relativamente similar a una distribución normal, permitiendo la presencia ocasional de valores atípicos. Por su parte, los precios de los combustibles y la cantidad de vehículos muestran una distribución platicúrtica, caracterizada por una menor probabilidad de observar una concentración de valores extremos alejados de la media o la presencia de algún valor atípico.

Con respecto a la variabilidad relativa de los datos con respecto a la media, se observa que todas las variables presentan un grado de homogeneidad notable con coeficientes de variación (cv) moderadamente bajos (10.5, 8.1, 7.9, 3.8, 11.4 y 10.6) a diferencia del coeficiente de variación (cv) para la cantidad de bicicletas (32.8) que se ha registrado un valor ligeramente alto (ver tabla 1). Esto da una referencia que la media calculada constituye una estimación confiable de la media población, reflejando una alta precisión de esta medida de tendencia central para interpretar buenos resultados.

A continuación, en la figura 1, se ilustra las distribuciones descritas para cada una de estas 7 variables.

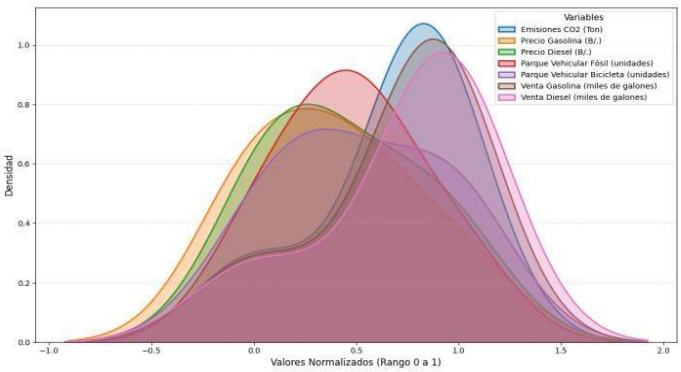


Fig. 1. Distribución de densidad de Kernel (KDE)

A. Análisis Exploratorio

El análisis conjunto de las siete variables permitió

comprender de manera integral el comportamiento y la interacción de cada una dentro del sistema de transporte terrestre y sus emisiones asociadas. Por ejemplo, al comparar la evolución de los precios de los combustibles entre los años 2017 y 2021, se observó que los precios de la gasolina se mantuvieron consistentemente por encima de los precios del diésel, lo que puede influir en las decisiones de consumo de los usuarios y en la demanda relativa de cada tipo de combustible. Este patrón también puede reflejar políticas fiscales, variaciones en la oferta y la demanda internacional de petróleo y estrategias de subsidio o regulación implementadas durante ese período.

Además, la comparación de estas tendencias con otras variables, como el parque vehicular y las ventas de combustibles, permitió identificar posibles correlaciones entre los precios y el comportamiento del consumo. La figura 2 muestra la evolución de los precios del combustible desde el año 2017 hasta el año 2021. Como se aprecia en la figura 2, los precios de la gasolina fueron siempre más altos que los del combustible diésel. Para el año 2018, hubo un incremento de precio con respecto al año 2017. Sin embargo, con respecto a los años 2019 y 2020, hubo un decremento de los precios con respecto al año 2018 y luego en el año 2021 se incrementaron los precios de la gasolina en comparación con todos los años anteriores. Este comportamiento también ocurrió con el caso del combustible diésel.

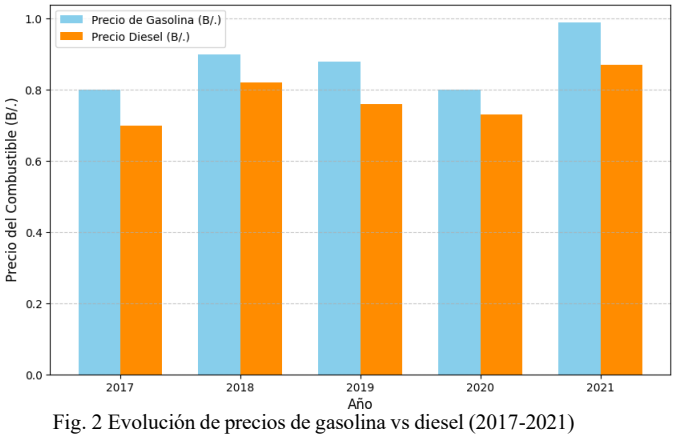


Fig. 2 Evolución de precios de gasolina vs diesel (2017-2021)

La figura 3 muestra que las ventas de diésel son superiores a las de gasolina, lo que puede deberse a varios factores: su menor precio, una mayor proporción de vehículos que utilizan este combustible, o una mayor tasa de consumo volumétrico del diésel en comparación con la gasolina. Independientemente de la causa específica, este hallazgo resultó relevante al analizar la relación entre las ventas de combustible y las emisiones de CO2 relacionadas con el transporte terrestre.

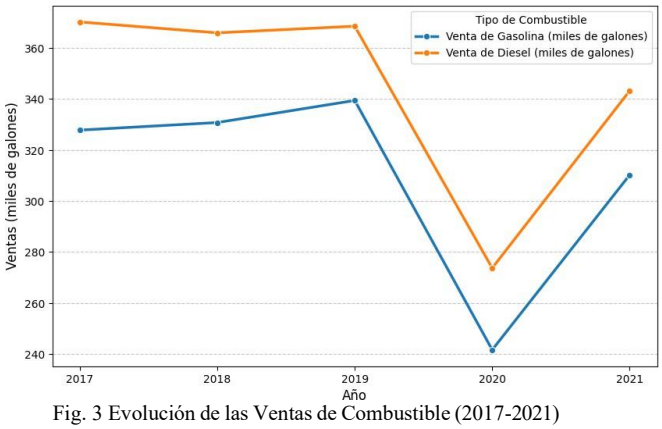


Fig. 3 Evolución de las Ventas de Combustible (2017-2021)

Al analizar conjuntamente el consumo de combustible y las emisiones de CO_2 relacionadas con los vehículos terrestres, se observó que el diésel presentó un mayor consumo que la gasolina para una misma cantidad de emisiones. Esto indica que, en términos de volúmenes de gases de escape emitidos, el impacto ambiental del diésel es mayor que el de la gasolina, sin considerar la composición específica de dichos gases. Este comportamiento puede estar asociado a la eficiencia energética y al tipo de motores que utilizan cada combustible, así como a las características del parque vehicular y los patrones de uso del transporte.

A continuación, la figura 4 ilustra la relación descrita entre el consumo de combustible y las emisiones de CO_2.

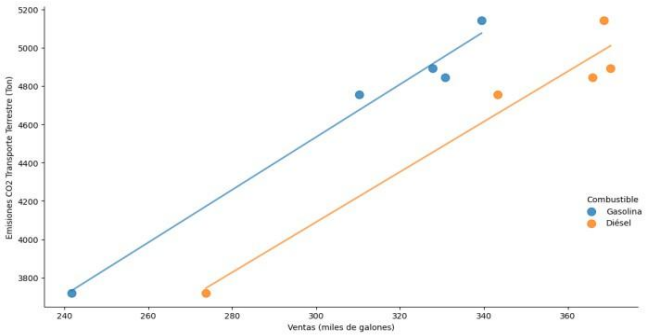


Fig 4 Relaciones entre las ventas y emisiones de CO_2

Al analizar otro conjunto de variables, específicamente el parque vehicular motorizado (automóviles, sedán, autobuses, camiones, motocicletas, entre otros) y los vehículos no motorizados, considerando únicamente las bicicletas, se pueden extraer conclusiones relevantes. Entre el 2017 y 2021, el parque vehicular motorizado mostró un incremento sostenido, mientras que la cantidad de bicicletas disminuyó, evidenciando una relación inversamente proporcional entre ambas variables, tal como se observa en la figura 5.

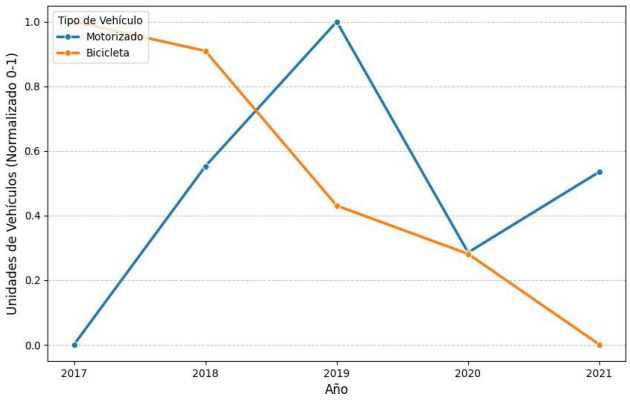


Fig 5 Evolución del parque vehicular (2017-2021)

En síntesis, se identifican algunos puntos en común, el primero es que el incremento del parque vehicular motorizado conlleva a un mayor consumo de combustibles. A su vez, el precio del combustible podría influir en la preferencia de consumo entre ambos tipos, aunque independientemente de esta elección, ambos representan una carga significativa para el medio ambiente debido a las emisiones de gases de escape, entre los cuales el CO_2 constituye uno de los compuestos predominantes. La relevancia relativa de cada variable en relación con las emisiones de CO_2 generadas por los vehículos motorizados de transporte terrestre será abordada mediante el análisis de correlación presentado en el siguiente punto.

El último punto en común identificado corresponde a un patrón distintivo observado en todas las gráficas, específicamente en el año 2020, donde se registra una disminución sustancial en cada una de las variables analizadas (ver figura 2 y 3).

C. *Análisis de Correlación*

Para comprender la influencia o el peso que existe entre cada una de las variables, y principalmente cada variable con respecto a las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) relacionadas al transporte terrestre, se construyó la matriz de correlación mostrada en la figura 6.

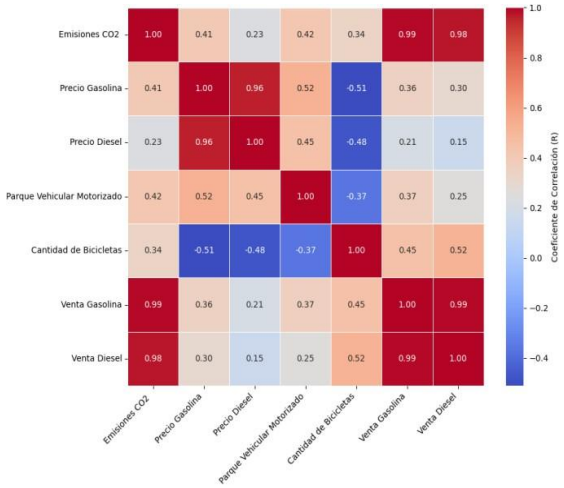


Fig 6 Mapa de Calor de la Matriz de Correlación

Lo primero que se observa en la matriz es la correlación negativa entre la cantidad de bicicletas registradas y las variables asociadas con los precios de combustibles de la gasolina (-0.51) y diésel (-0.48), así como con el parque vehicular motorizado (-0.37). Esta relación inversamente proporcional coincide con los resultados de la figura 5. Sin embargo, en el caso de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), la correlación con la cantidad de bicicletas registradas es positiva (0.34), pero de magnitud muy baja. Esto indica que la presencia de bicicletas en el parque vehicular no ejerce un efecto significativo sobre la reducción de emisiones, dado que las demás variables, directamente relacionadas con las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y con los coeficientes de correlación mucho más altos, por ejemplo, la venta de gasolina (0.99) y la venta de diésel (0.98), ambas con una correlación positiva casi perfecta muy cercana al valor de 1, por lo que se demostró que poseen un mayor peso en el impacto ambiental que el número de bicicletas registradas (ver figura 6).

Por lo tanto, encontramos coeficientes de correlación cercanos a 1 entre las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y las ventas de combustibles, dando pie a la fuerte relación que existe entre estas variables. Sin embargo, el parque vehicular y el precio de la gasolina mantienen una correlación positiva de moderada a baja (0.52) y el precio del diésel (0.45) una correlación muy baja, lo que nos indica que estas últimas son variables que dependen más de otros factores y no influyen directamente en las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) (ver figura 6).

A. *Modelo Predictivo*

Uno de los objetivos principales de este estudio es proyectar el comportamiento futuro de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) relacionados al transporte terrestre, uno de los gases de efecto invernadero con mayor impacto ambiental. Para ello, se emplearon los datos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI), que abarca el período comprendido entre los años 2000 y 2021. La predicción de las emisiones de dióxido de carbono (CO2) se realizó para el intervalo 2023-2026 mediante la aplicación del modelo autorregresivo integrado de medias móviles (ARIMA), seleccionado por reflejar de manera más adecuada una tendencia temporal conservadora que un patrón de estacionalidad. En la figura 7, se presentan los valores ajustados por el modelo en comparación con los datos reales observados, lo que permite visualizar el error de ajuste o residual resultante del proceso de estimación para cada valor.

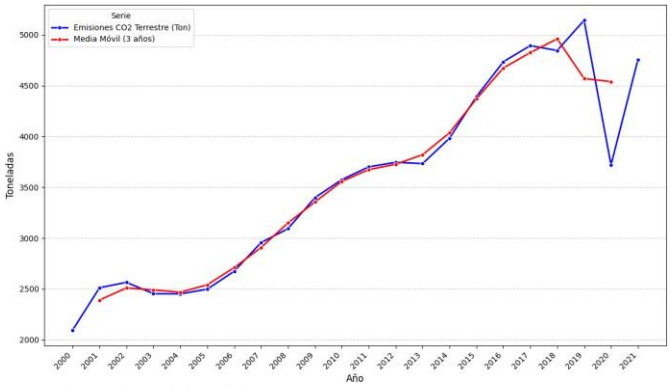


Fig 7 Ajuste del modelo ARIMA (2000-2021)

Los resultados de la figura 7 arrojaron que el ajuste del modelo presenta valores residuales pequeños hasta el año 2020, donde se identifica un valor atípico, señalado en el punto D (Modelo Predictivo). Los valores correspondientes a los años 2020 y 2021 no siguen la tendencia creciente observada en los años previos, durante los cuales las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) mostraban un aumento considerable. Estos valores atípicos presentan pendiente negativa, atribuible al evento global del COVID-19, el cual generó una reducción temporal de las emisiones. Este fenómeno puede interpretarse como un punto de inflexión que interrumpió el crecimiento sostenido de la contaminación y evidenció la influencia de cambios en la actividad humana sobre el medio ambiente.

Posteriormente, se observó un período de recuperación, durante el cual la tendencia de las emisiones podría volver a incrementarse. No obstante, el grado de aumento dependerá de la conciencia ambiental, estado de la economía y las medidas implementadas tras el valor atípico del año 2020. Para reflejar estas consideraciones en el modelo, se procedió a un ajuste adicional. En lugar de eliminar el valor atípico del año 2020, se incorporará su efecto mediante la sustitución con valores residuales del modelo para los años 2019 y 2020, correspondientes a 4568.15 y 4538.27 toneladas de CO_2, respectivamente. Esta estrategia permite representar el período de recuperación considerando una tendencia al incremento más suavizada. Los resultados de este ajuste se presentan en la figura 8.

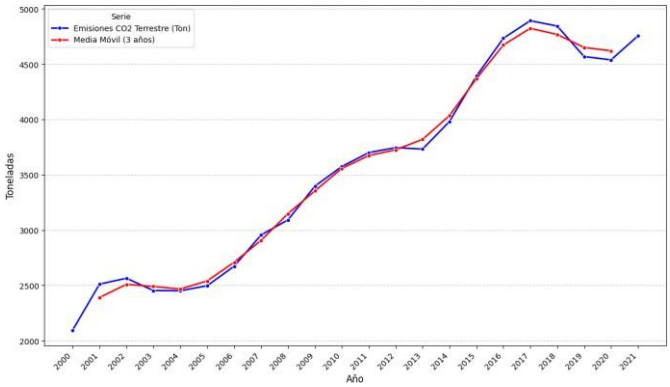


Fig 8 Ajuste del Modelo ARIMA sin el valor atípico

El valle observado en el gráfico entre los años 2019 y 2021, representando los valores "reales", corresponde al período de recuperación posterior al impacto del COVID-19. Se asume que la tendencia retomará el ritmo observado en los años previos a la pandemia, lo que permitirá al modelo predecir con un menor error residual, los valores de los años siguientes. Esto se deberá a que el modelo ya no se verá afectado por el punto de inflexión causado por un evento extraordinario (pandemia Covid 19), que representó una desviación temporal respecto al comportamiento habitual del consumo de combustible y las emisiones generado por la actividad humana.

Considerando el modelo ajustado presentado la figura 8, fue posible calcular las métricas de evaluación que permiten determinar la confiabilidad del modelo. Estas métricas proporcionan información sobre el grado de ajuste del modelo a los datos históricos, así como sobre la precisión y estabilidad de sus predicciones. En la tabla 2 se presentan los resultados de dichas métricas para el modelo ARIMA ajustado, lo que permitió identificar posibles desviaciones y evaluar la capacidad del modelo para replicar patrones observados en las emisiones de CO_2.

TABLA 2
MÉTRICAS DE EVALUACIÓN PARA EL MODELO ARIMA

MSE (Error Cuadrático Medio)	3490.65
MAD (Desviación Media Absoluta)	52.57
MAPE (Error Absoluto Medio %)	1.53%
TS (Señal de Rastreo)	1.27
σ (Desviación Estándar)	60.52
R (Coeficiente de Correlación)	0.9976

Los resultados de las métricas de evaluación indican que el modelo presenta un desempeño adecuado y confiable. El MAPE (Error Porcentual Absoluto Medio) se encuentra por debajo del 5%, lo que implica que solo se desvía un 1.53% de los valores reales de emisiones respecto a la media móvil. Asimismo, el MAD (Desviación Media Absoluta) con valor de 52.57 y el MSE (Error Cuadrático Medio) con valor de 3490.65 muestran valores bajos en relación con la magnitud de los valores reales, lo que confirma la precisión del ajuste

del modelo con respecto a los registros históricos.

El valor TS (Señal de Rastreo) sugiere que no existe un sesgo significativo en el pronóstico, ya que se encuentra dentro del rango de ±3 a ±4. La baja dispersión de los valores residuales, indicada por la desviación estándar, y la alta correlación positiva cercana a 1, evidencian la capacidad del modelo para replicar los resultados mediante una función matemática que se ajusta satisfactoriamente a los datos observados.

El modelo se evaluó mediante la predicción de los valores correspondientes a los cinco años posteriores a 2021, último año con información disponible sobre emisiones de CO_2 proporcionada por el INGEI. La figura 9 y la tabla 3 muestran los resultados de la proyección del modelo para el período 2022–2026.

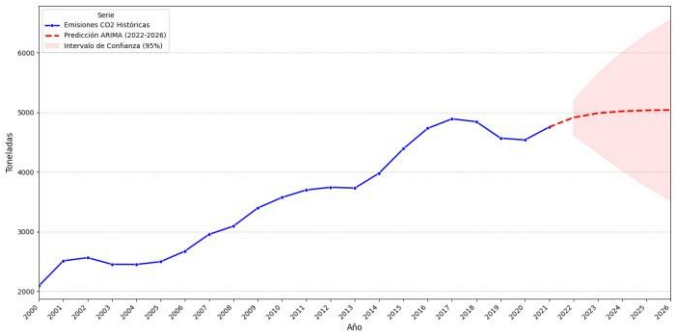


Fig 9 Predicción de las emisiones de CO_2 entre los años 2022 y 2026

TABLA 3
PREDICCIONES DE EMISIONES CO_2 CON MODELO ARIMA

Año	Emisiones CO_2 Terrestre (Ton)
2022	4914.36
2023	4986.81
2024	5019.65
2025	5034.53
2026	5041.27

Esta proyección indica un nivel de emisiones para el año 2026 de 5041.27 toneladas.

V. DISCUSIÓN

El presente estudio abre la posibilidad de un nuevo enfoque de análisis, en donde a partir de la identificación de valores atípicos históricos, por efecto de la pandemia Covid-19, surge la interrogante sobre qué acciones pueden implementarse para reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero. Una de las respuestas más evidentes es la reducción de la circulación de vehículos que emplean combustibles fósiles. Por tal motivo, resulta necesario proponer propuestas de movilidad que diversifiquen la matriz de transporte, promoviendo la inclusión de alternativas sostenibles como el uso de bicicletas dentro de la infraestructura vial o ciclovías segregadas. En Gil *et al.,* [24] se consideró que el fomento de las ciclovías incentiva el uso de bicicletas, el ejercicio, el bienestar y contribuye a reducir los efectos nocivos de los automóviles. Todo esto contribuye a la salud física y mental de la población.

Si bien la inclusión de medios de transporte que no generen emisiones de gases de efecto invernadero dentro de la matriz vial constituye una estrategia necesaria, su éxito no depende únicamente de la inversión en infraestructura. También son necesarios considerar otros aspectos tales como: aspectos legales, climáticos, económicos, culturales y el factor humano. Todo esto requiere de una cultura vial orientada a la sostenibilidad, en la que la protección del medio ambiente se considere un eje fundamental para fomentar la adopción de alternativas de transporte sin combustibles fósiles.

Los resultados obtenidos arrojaron la necesidad fundamental de identificar las variables que interactúan directamente con las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) para orientar estrategias de mitigación realistas y efectivas. Por ejemplo, una de las propuestas consiste en modificar la cultura de movilidad, promoviendo cambios en los hábitos de consumo de combustible. En ese sentido, el desarrollo de una infraestructura vial que favorezca el incremento del parque vehicular no motorizado (bicicletas) y la disminución del parque vehicular motorizado puede generar un impacto significativo en la reducción de las emisiones. De acuerdo con los resultados de este estudio, este efecto actualmente no se observa, ya que, en lugar de aumentar la cantidad de bicicletas, se ha registrado una disminución de estas, lo que evidencia la relación inversamente proporcional entre ambos tipos de parque vehicular y resalta la necesidad de políticas de transporte sostenible en la Ciudad de Panamá con respecto al uso de bicicletas.

El modelo utilizado para la proyección mostró, a través de sus métricas de evaluación, un nivel adecuado de precisión y confiabilidad, lo que respalda que la tendencia proyectada con respecto al incremento de emisiones de dióxido de carbono (CO2) es consistente con los datos históricos empleados en este estudio, la trayectoria general indicó un aumento sostenido de las emisiones. En este contexto, el énfasis debe centrarse en generar las recomendaciones y los estudios que permitan desarrollar estrategias para fomentar una cultura vial orientada a la protección del medio ambiente, así como para reducir los patrones de consumo excesivo asociados al incremento de las emisiones.

En Panamá se han desarrollado estudios [25], [26], [27], [28], [29],[24] e iniciativas relevantes, como la ciclovía que conecta las comunidades del El Ejido con Agua Buena en la provincia de Los Santos, la que unir a La Arena con Pesé en la provincia de Herrera, las ciclovías recreativas que aportan al turismo en la región como la que se extiende desde Chitré hasta la playa El Agallito, o la ciclovía de la Calzada de Amador en la ciudad de Panamá. Actualmente, entidades como el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Ministerio de Ambiente (MIAMBIENTE) mantienen en planificación y ejecución nuevos proyectos, entre ellos la ciclovía de Gamboa. En Murillo *et al.,* [24] se realizó una encuesta a los ciclitas de la cinta costera y se determinó que estos estarían dispuestos a cambiar su medio de transporte habitual por la bicicleta, ya

que este es más rentable, ayuda a la salud y no contamina. En Murillo *et al.,* [24], el perfil de los ciclistas correspondió a un 87% con perfil universitario y se indicó que la principal razón por la cual no usaban la bicicleta como medio de transporte es la ausencia de ciclovías, la segunda razón es epor riesgos a tener accidentes y la tercera razón es por temas de falta de seguridad.

En Kong-Wieng y Perén-Montero [25], se concluyó que la Avenida Cincuentenario presenta condiciones favorables para la implementación de estrategias de movilidad activa y el diseño de infraestructura ciclista sostenible.

En Gil *et al.,* [24] se propuso la construccion de ciclovías por etapas empezando por la campus Central de la Universidad de Panamá (UP) con las estaciones Iglesia del Carmen y Vía Argentina de la Red de Metro de Panamá.

No obstante, la mayoría de estas iniciativas se han orientado a usos recreativos, deportivos o turísticos, sin responder a una transformación estructural de la matriz de transporte de la Ciudad de Panamá. Para lograr un verdadero cambio, se requiere rediseñar y ejecutar los proyectos de infraestructura vial integrados que interconecten vías principales, de manera que la ciudadanía disponga de opciones reales para utilizar medios de transporte sostenibles en sus desplazamientos cotidianos, incluyendo traslados hacia y desde el trabajo, en condiciones comparables a las de un autobús o un automóvil en cuanto a ruta exclusiva.

A parte de las iniciativas estatales o de gobierno, también existe una iniciativa privada denominada "Panamá en Bici"[23], impulsada por la familia Carretero, cuyo objetivo principal es promover la construcción de una infraestructura vial de gran escala que abarque las principales avenidas de la Ciudad de Panamá. Esta propuesta, concebida como un *máster plan*, contempla aproximadamente 80 kilómetros de ciclovías destinados a fortalecer la movilidad urbana no motorizada, con la proyección de extender el sistema a nivel nacional mediante la carretera Panamericana, y hacia el interior del país, a través de la carretera Dr. Belisario Porras.

Los resultados presentados aquí, han considerado variables como: Emisiones CO2 Transporte Terrestre (Ton), Precio de Gasolina (B/.), Precio Diesel (B/.), Parque Vehicular Motorizado Fósil (unidades), Parque Vehicular No Motorizado (Bicicleta) (unidades), Venta de Gasolina (miles de galones) y Venta de Diesel (miles de galones) han permitido analizar el impacto que tiene una infraestructura vial para vehículos no motorizados en la reducción de las emisiones de gases invernadero. Dicho análisis ha permitido generar evidencia estadística que sustente el potencial impacto ambiental de este tipo de proyectos y que sirva como insumo para instituciones como el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Ministerio de Ambiente (MIAMBIENTE).

VI. Conclusión

Las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO2), constituyen actualmente una amenaza significativa para el medio ambiente. El análisis de correlación evidenció que las ventas y el consumo de combustible, tanto diésel como gasolina, tienen un impacto directo en el aumento de las emisiones, y que a su vez estas variables se incrementan proporcionalmente con el crecimiento del parque vehicular motorizado, siendo estas las variables más significativas que inciden en las emisiones y absorciones de gases son las directamente relacionadas con las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) Estos quedó evidenciado en los coeficientes de correlación mucho más altos en la matriz de confusión, por ejemplo, la venta de gasolina (0.99) y la venta de diésel (0.98), ambas con una correlación positiva casi perfecta muy cercana al valor de 1, por lo que se demostró que poseen un mayor peso en el impacto ambiental. La tendencia histórica de las emisiones desde el año 2000 muestra una pendiente pronunciada, indicando un incremento sostenido a lo largo del tiempo. Sin embargo, los años 2019 y 2020 representan un punto de inflexión en esta tendencia debido a la reducción temporal de la actividad humana provocada por la pandemia de COVID-19, lo que permitió un descanso ambiental y retrasó momentáneamente el aumento esperado de las emisiones, antes de que la tasa de crecimiento retomara su comportamiento habitual. El MAPE (Error Porcentual Absoluto Medio) arrojo un valor por debajo del 5%, lo que implica que solo se desvía un 1.53% de los valores reales de emisiones respecto a la media móvil. Asimismo, el MAD (Desviación Media Absoluta) con valor de 52.57 y el MSE (Error Cuadrático Medio) con valor de 3490.65 muestran valores bajos en relación con la magnitud de los valores reales, lo que confirma la precisión del ajuste del modelo con respecto a los registros históricos. La cantidad de bicicletas registradas y las variables asociadas con los precios de combustibles de la gasolina presentan una correlación negativa (-0.51) y diésel (-0.48) respectivamente, así como con el parque vehicular motorizado (-0.37).

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) por su apoyo institucional y por proporcionar los recursos necesarios para el desarrollo de programas de postgrado que fortalecen la educación superior.

Referencias

[1] Organización Meteorológica Mundial, *Estado del Clima Mundial 2022*. Geneva, Switzerland: WMO, 2023. [Online]. Available: https://library.wmo.int/records/item/68835-state-of-the-global-climate-2023

[2] P. Bocanegra-Calderón, "Modelo Propulsivo de un Buque Alimentado con Combustibles Renovables – Análisis del Impacto Ambiental en una Ruta Real de Transporte," Universidad de Sevilla, 2025. [Online]. Available: https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/61a3cc9d-1f03-4274-8e0d-c6599c0f2312/content

[3] I. Aizpuru *et al.*, "Informe final, Estudio base para Ciudad de Panamá: Estudio de Mitigación del cambio climático." BID,

Panama, República de Panamá, p. 173, 2013. [Online]. Available: https://dpu.mupa.gob.pa/wp-content/uploads/2017/06/CE1_Informe-final-Panama.pdf

[4] D. Campos, S., Cárdenas, "Modelado de la Reducción de la Huella de Carbono en Panamá: Vehículos y Cocinas Eléctricas," *Rev. I+D Tecnológico*, vol. 21, no. 1, p. 14, 2025, doi: 10.33412/idt.v21.1.4091.

[5] A. González González, "El Medio Ambiente en Países en Vías de Desarrollo," Universidad de Valladolid, 2025. [Online]. Available: https://uvadoc.uva.es/handle/10324/77460

[6] Mi ambiente, "Panamá y el abordaje del cambio climático," Cambio climático en Panamá. [Online]. Available: https://dcc.miambiente.gob.pa/cambio-climatico-en-panama/

[7] Asamblea Nacional de Panamá, *Ley N°10. (12 de abril de 1995). Por la cual se aprueba la convención marco de la naciones unidas sobre el cambio climático, hecha el 9 de abril de 1992*. Panamá: Gaceta Oficial Digital, 1995, p. 37. [Online]. Available: http://gacetas.procuraduria-admon.gob.pa/22763_24099.pdf

[8] Asamblea Nacional de Panamá, "Ratificación del Protocolo de Kioto. (Fecha de ratificación: 5 de marzo de 1999)." Asamblea legislativa de Panamá, Panamá, 1999. [Online]. Available: https://treaties.un.org/pages/viewdetails.aspx?src=treaty&mtdsg_no=xxv ii-7-a&chapter=27&clang=_en

[9] Asamblea Nacional de Panamá, "Ley 40 de 12 de septiembre de 2016, por la cual se aprueba el Acuerdo de París, hecho en París el 12 de diciembre de 2015.," Gaceta Oficial 28115-B. [Online]. Available: http://gacetas.procuraduria-admon.gob.pa/28115-B_2016.pdf

[10] Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM), "Primera comunicación nacionla sobre cambio climático." Autoridad Nacional del Ambiente, Panamá, República de Panamá, p. 155, 2001. [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/panama-complete.pdf

[11] Ministerio de ambiente, "Decreto Ejecutivo N° 100 de 20 de octubre de 2020, que reglamenta el capítulo II del título V del texto único de la Ley 41 de 1 de julio de 1998, general del ambiente de la República de Panamá, sober la mitigación del cambio climático global, crea el prog," vol. 204, no. 29138. Gaceta Oficial Digital, Pananmá, República de Panamá, pp. 1–44, 2020. [Online]. Available: https://www.gacetaoficial.gob.pa/storage/gacetas/2020/10/29138_C/GacetaNo_29138c_20201020.pdf

[12] S. Vergara, L. Arcia, J. Jaén, C. Acosta, and E. Alvarez de León, "Resolución Ministerial que adopta el Manual de Procedimientos del Sistema Sostenible de Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (SSINGEI). Gaceta Oficial N° 29581-C." ANAM, Panamá, República de Panamá, p. 73, 2022. [Online]. Available: https://sinia.gob.pa/manual-de-procedimientos-para-la-supervision-control-y-fiscalizacion-ambiental-ano-2013/

[13] Ministerio de Ambiente (MIAMBIENTE), "Primer informe bienal de transparencia de panamá ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático 1," Panamá, República de Panamá, 2024. [Online]. Available: https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/103/ti313.pdf#page%3D41

[14] M. Zorrilla, V., Fernández, N., & Petz, "Análisis de GEI en el sector del transporte en España," *Rev. Técnica Ind.*, vol. 313, pp. 38–42, 2016, [Online]. Available: https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/103/ti313.pdf#page%3D41

[15] A. Berbey-Alvarez, J. Guevara-Cedeño, H. Alvarez, and J. Sanz Bobi, "Panama metro bus system and metro line 1: An externalities analysis of CO2 emissions spectre (ES2DE)," in *2017 International Conference in Energy and Sustainability in Small Developing Economies (ES2DE)*, Funchal, Portugal: IEEE, 2017, pp. 1–9. doi: 10.1109/ES2DE.2017.8015336.

[16] J. Guevara-Cedeño, J. Aguilar, J. Torabi, and A. Berbey-Alvarez, "Electric mobility in Panama: A review," in *2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE)*, 2018 Energy and Sustainability for Small Developing Economies (ES2DE), Ed., Funchal, Portugal,: IEEE, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ES2DE.2018.8494305.

[17] C. Muentes, K., Pereira, J., Rivadeneira, R., & Moreira, "Factores determinantes de las emisiones de CO2 en los sectores industrial y transporte en Ecuador," *Rev. Científica Ciencias Nat. Y Ambient.*, vol. 16, no. 2, 2022, doi: 10.53591/cna.v16i2.1867.

[18] C. Jorge-Salgado, "Análisis de fuentes de financiamiento y entidades inversoras para políticas y medidas de mitigación de emisiones de gases efecto invernadero a ser adoptadas en el sector transporte urbano en Latino América," UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, 2016. [Online]. Available: https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/d127e71d-6c3a-4573-97d2-9b2429638bb1/content

[19] G. Halcón-Gibert, "Movilidad Urbana sostenible y BICIMAD: Un análisis mediante modelos predictivos," Universidad Politécnica de Madrid, 2024. [Online]. Available: https://oa.upm.es/83903/1/TFG_GONZALO_HALCON_GIBERT.pdf

[20] A. Gallego, "Análisis sobre la contaminación en la ciudad de Madrid," Universidad Politécnica de Madrid, 2017. [Online]. Available: https://oa.upm.es/47841/1/TFG_ALVARO_GALLEGO_GARCIA.pdf

[21] & J. P. Kshirsagar, M., Vaidya, G., Rajguru, S., "DECART: Planning for Decarbonizing Transport Sector with Predictive Analytics - An Irish Case Study. Conferencia internacional de Ciudades pequeñas y verdes, ICT System.," in *Conferencia internacional de Ciudades pequeñas y verdes, ICT System.*, SCITEPRESS – Science and Technology Publications, Lda, 2022, p. 8. [Online]. Available: https://www.scitepress.org/Papers/2022/110871/110871.pdf

[22] W. Espitaleta, J., Maza, J. García, K., Varela, E., Bernal, "Análisis de Sentimientos de Reseñas para Determinar la acogida de un Producto Utilizando Técnicas de Machine Learning y Data Mining," Universidad del Norte.

[23] Panamá en Bici, "Infraestructura Panamá." [Online]. Available: https://panamaenbici.com/infraestructura-panama/

[24] M. Gil, Y. Cruz, J. Fernandez, A. Arauz, and J. Perén, "Propuesta de ciclovóas para conectar el campus de la Universidad de Panamá (UP) con la ciudad de Panamá," *SusBCity Vol.2,* vol. 2, no. 1, pp. 48–52, 2020, [Online]. Available: file:///C:/Users/aberb/Downloads/suscity,+8_Bici_PlamUP_Ciudad_ICT_Eq10_Giletal2019.pdf

[25] G. Murillo, B. Montuto, and S. Building, "Potencial del uso de la bicicleta en panamà," *SusBCity*, vol. 1, no. 1, pp. 35–39, 2019, [Online]. Available: https://revistas.up.ac.pa/index.php/SusBCity/article/download/463/381

[26] R. Kong-Wieng and J. Perén-Montero, "Potencial de mejora de la movilidad activa en la avenidad cincuentenario: ciclorruta de conexión," *SusBcity*, vol. 8, no. 1, pp. 22–31, 2026, [Online]. Available: https://revistas.up.ac.pa/index.php/SusBCity/article/view/9376

[27] A. Saporta-Salomón, *El espacio público de PAnamá y la rehabilitación de la avenidad central*. Huelva, España: Universidad Internacional de Andalucía, 2013. [Online]. Available: https://dspace.unia.es/handle/10334/2569

[28] A. Donoso, "Planteamiento de estrategias para el mejoramiento y sostenibilidad de la logística urbana: caso Ciudad de Panamá," Universidad de Panamá, 2023. [Online]. Available: https://up-rid.up.ac.pa/8293/1/audrey_donoso.pdf

[29] G. Atencio, "Factibilidad de la construcción de ciclovías y readecuación de la red vial en la ciudad de David," Universidad Santa María La antigua. doi: doi.org/10.37387/speiro.tm.591.