



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE**

**QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**ANÁLISIS DEL BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL COMO  
HERRAMIENTA PARA PROCESOS DE DESCARBONIZACIÓN EN EL  
SECTOR DEL TRANSPORTE, EVALUACIÓN DE MÉTODO Y ESCENARIOS  
SOSTENIBLES**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniera Industrial

**AUTORA: GISELA ALICIA NACIMBA LOACHAMÍN**

**TUTOR: CRISTIAN CRISTÓBAL CUJI CUJI**

Quito – Ecuador

2024

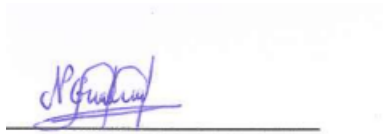
## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Gissela Alicia Nacimba Loachamín con documento de identificación N° 1756145171 manifiesto que:

Soy la autora responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 26 de enero de 2024

Atentamente,



Gissela Alicia Nacimba Loachamín

1756145171

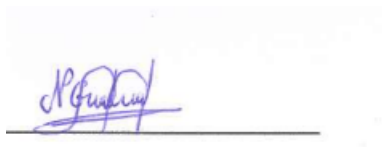
## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Gissela Alicia Nacimba Loachamín con documento de identificación No. 1756145171, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Proyecto Técnico: “ANÁLISIS DEL BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL COMO HERRAMIENTA PARA PROCESOS DE DESCARBONIZACIÓN EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE, EVALUACIÓN DE MÉTODO Y ESCENARIOS SOSTENIBLES ”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Industrial, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega final del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de enero de 2024

Atentamente,



Gissela Alicia Nacimba Loachamín

1756145171

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Cristian Cristóbal Cuji Cuji con documento de identificación N° 1718002221, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DEL BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL COMO HERRAMIENTA PARA PROCESOS DE DESCARBONIZACIÓN EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE, EVALUACIÓN DE MÉTODO Y ESCENARIOS SOSTENIBLES, realizado por Gissela Alicia Nacimba Loachamín con documento de identificación N° 1756145171, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de enero de 2024

Atentamente,



---

Ing. Cristian Cristóbal Cuji Cuji

1718002221

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres Alicia y Olmedo por siempre guiarme por el buen camino, apoyarme en todo momento y no dejar que me rinda, y hermanos Nataly, Fabricio, Esteven y Richard, por todos los momentos que hemos compartido juntos. Y a mi querido t gracias por todo.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme fortaleza para poder llegar a este punto de mi vida en el cual culmino mis estudios universitarios y también por bendecirme con una familia maravillosa ya que sin el apoyo de ellos no podría haberlo conseguido.

Agradezco mis padres, por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida, su compañía en momentos tanto buenos como malos y el amor que siempre me han demostrado. A mis hermanos y hermana les agradezco por la compañía, confianza y cariño que me han brindado. Los quiero mucho.

## Índice de contenido

|  |            |
|--|------------|
| <b>CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....</b>   | <b>ii</b>  |
| <b>CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .....</b> | <b>iii</b> |
| <b>CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....</b>  | <b>iv</b>  |
| <b>DEDICATORIA.....</b>  | <b>v</b>   |
| <b>AGRADECIMIENTO .....</b>  | <b>vi</b>  |
| <b>Índice de contenido.....</b>  | <b>vii</b> |
| <b>Índice de tablas.....</b>   | <b>x</b>   |
| <b>Índice de figuras.....</b>  | <b>xi</b>  |
| <b>Resumen.....</b>  | <b>xii</b> |
| <b>Abstract.....</b>   | <b>xii</b> |
| <b>Introducción.....</b>   | <b>1</b>   |
| Antecedentes .....   | 2          |
| Problema .....   | 3          |
| Justificación.....   | 3          |
| Objetivos .....  | 4          |
| Objetivo general .....   | 4          |
| Objetivos específicos.....   | 4          |
| <b>Capítulo I.....</b>   | <b>5</b>   |
| <b>1. Marco Teórico .....</b>  | <b>5</b>   |
| 1.1 Balance Energético Nacional .....  | 5          |
| 1.1.1 Consumo de Energía .....   | 5          |
| 1.1.2 Fuentes de energía .....   | 5          |
| 1.2 Sector del transporte.....   | 6          |
| 1.2.1 Importancia del sector del transporte .....  | 7          |
| 1.2.2 Tipos de transporte.....   | 7          |
| 1.2.3 Nacional .....   | 8          |
| 1.2.4 Mundial .....  | 9          |
| 1.2.5 Ventajas y desventajas .....   | 9          |
| 1.3 Descarbonización .....   | 10         |
| 1.3.1 Impacto.....   | 10         |
| 1.4 Metodología .....  | 11         |
| 1.4.1 Arima.....   | 11         |
| 1.4.2 Proyecciones de datos .....  | 11         |
| <b>Capítulo II.....</b>  | <b>12</b>  |
| <b>2. Desarrollo .....</b>   | <b>12</b>  |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.1 Descripción de la solución .....   | 12        |
| 2.2 Datos de consumo sector del transporte .....                                   | 12        |
| 2.2.1 Consumo energético sector transporte 2010-2022 .....                         | 12        |
| 2.2.2 Consumo energético del transporte terrestre 2013-2022 .....                  | 14        |
| 2.2.3 Datos del consumo energético del transporte marítimo 2013-2022 .....         | 15        |
| 2.2.4 Datos del consumo energético del transporte aéreo 2013-2022.....             | 17        |
| 2.3 Datos de descarbonización 2010-2022.....                                       | 18        |
| 2.4 Propuesta de evaluaciones y pronósticos .....                                  | 19        |
| 2.4.1 Análisis de datos .....  | 19        |
| 2.4.2 Pronósticos lineales .....   | 20        |
| 2.4.3 Parámetros del modelo ARIMA .....  | 20        |
| 2.5 Flujo de interrelación .....   | 21        |
| 2.5.1 Diagrama de flujo .....  | 21        |
| <b>Capítulo III .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>3. Análisis de resultados .....</b>   | <b>22</b> |
| 3.1 Datos de la energía consumida en el sector transporte 2010-2030 .....          | 22        |
| 3.1.1 Modelo uno de la energía consumida del sector del transporte 2010-2030.....  | 23        |
| 3.1.2 Modelo dos de la energía consumida del sector del transporte 2010-2030 ..... | 24        |
| 3.1.3 Modelo tres de la energía consumida del sector del transporte 2010-2030..... | 25        |
| 3.1.4 Comparación de los tres modelos sector del transporte 2010-2030.....         | 25        |
| 3.2 Datos de la energía consumida del transporte terrestre 2013-2030.....          | 26        |
| 3.2.1 Modelo uno de la energía consumida del transporte terrestre 2013-2030.....   | 27        |
| 3.2.2 Modelo dos de la energía consumida del transporte terrestre 2013-2030 .....  | 28        |
| 3.2.3 Modelo tres de la energía consumida del transporte terrestre 2013-2030.....  | 29        |
| 3.2.4 Comparación de los tres modelos del transporte terrestre 2013-2030.....      | 29        |
| 3.3 Datos de la energía consumida del transporte marítimo 2013-2030 .....          | 30        |
| 3.3.1 Modelo uno de la energía consumida del transporte marítimo 2013-2030.....    | 31        |
| 3.3.2 Modelo dos de la energía consumida del transporte marítimo 2013-2030 .....   | 32        |
| 3.3.3 Modelo tres de la energía consumida del transporte marítimo 2013-2030.....   | 33        |
| 3.3.4 Comparación de los tres modelos del transporte marítimo 2013-2030.....       | 33        |
| 3.4 Datos de la energía consumida del transporte aéreo 2013-2030 .....             | 34        |
| 3.4.1 Modelo uno de la energía consumida del transporte aéreo 2013-2030 .....      | 35        |
| 3.4.2 Modelo dos de la energía consumida del transporte aéreo 2013-2030.....       | 36        |
| 3.4.3 Modelo tres de la energía consumida del transporte aéreo 2013-2030 .....     | 37        |
| 3.4.4 Comparación de los tres modelos del transporte aéreo 2013-2030 .....         | 37        |
| 3.5 Datos de descarbonización 2010-2030.....                                       | 38        |
| 3.5.1 Modelo uno de las emisiones de GEI 2010-2030.....                            | 39        |
| 3.5.2 Modelo dos de las emisiones de GEI 2010-2030 .....                           | 40        |



|   |           |
|---|-----------|
| 3.5.3 Modelo tres de las emisiones de GEI 2010-2030.....                  | 41        |
| 3.5.4 Comparación de los tres modelos de emisiones de GEI 2010-2030 ..... | 41        |
| <b>Conclusiones.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>Recomendación .....</b>  | <b>43</b> |
| <b>Referencias.....</b>   | <b>44</b> |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Datos del sector del transporte 2010-2022 .....                | 13 |
| <b>Tabla 2.</b> Datos del transporte terrestre 2013-2022.....                  | 14 |
| <b>Tabla 3.</b> Datos del transporte marítimo 2013-2022 .....                  | 15 |
| <b>Tabla 4.</b> Datos del transporte aéreo 2013-2022 .....                     | 17 |
| <b>Tabla 5.</b> Datos de las emisiones de GEI .....                            | 18 |
| <b>Tabla 6.</b> Datos del sector del transporte 2010-2030 .....                | 22 |
| <b>Tabla 7.</b> Resultados de modelos del sector transporte 2010-2030.....     | 26 |
| <b>Tabla 8.</b> Datos del transporte terrestre 2013-2030.....                  | 27 |
| <b>Tabla 9.</b> Resultados de modelos del transporte terrestre 2013-2030 ..... | 30 |
| <b>Tabla 10.</b> Datos del transporte marítimo 2013-2030 .....                 | 31 |
| <b>Tabla 11.</b> Resultados de modelos del transporte marítimo 2013-2030 ..... | 34 |
| <b>Tabla 12.</b> Datos del transporte aéreo 2013-2030 .....                    | 35 |
| <b>Tabla 13.</b> Resultados de modelos del transporte aéreo 2013-2030 .....    | 38 |
| <b>Tabla 14.</b> Datos de las emisiones de GEI .....                           | 39 |
| <b>Tabla 15.</b> Resultados de modelos de emisiones de GEI 2010-2030.....      | 42 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 1.</b> Análisis del balance energético en el sector del transporte hasta sus proyecciones a futuro..... | 2  |
| <b>Figura 2.</b> Uso de la energía del sector transporte (kBEP) .....   | 14 |
| <b>Figura 3.</b> Uso de la energía del transporte terrestre (kBEP).....   | 15 |
| <b>Figura 4.</b> Uso de la energía del transporte marítimo (kBEP) .....   | 16 |
| <b>Figura 5.</b> Uso de la energía del transporte aéreo (kBEP) .....  | 18 |
| <b>Figura 6.</b> Emisiones de gases de efecto invernadero (ktonCO <sub>2</sub> eq).....                           | 19 |
| <b>Figura 7.</b> Diagrama de flujo .....  | 22 |
| <b>Figura 8.</b> Modelo uno del consumo energético total del sector del transporte.....                           | 24 |
| <b>Figura 9.</b> Modelo dos del consumo energético total del sector del transporte .....                          | 25 |
| <b>Figura 10.</b> Modelo tres del consumo energético total del sector del transporte .....                        | 25 |
| <b>Figura 11.</b> Gráfica de comparación de parámetros de los modelos sector transporte ...                       | 26 |
| <b>Figura 12.</b> Modelo uno del consumo energético del transporte terrestre .....                                | 28 |
| <b>Figura 13.</b> Modelo dos del consumo energético del transporte terrestre.....                                 | 29 |
| <b>Figura 14.</b> Modelo tres del consumo energético del transporte terrestre .....                               | 29 |
| <b>Figura 15.</b> Gráfica de comparación de parámetros de los modelos del transporte terrestre .....              | 30 |
| <b>Figura 16.</b> Modelo uno del consumo energético del transporte marítimo.....                                  | 32 |
| <b>Figura 17.</b> Modelo dos del consumo energético del transporte marítimo .....                                 | 33 |
| <b>Figura 18.</b> Modelo tres del consumo energético del transporte marítimo .....                                | 33 |
| <b>Figura 19.</b> Gráfica de comparación de parámetros de los modelos del transporte marítimo .....               | 34 |
| <b>Figura 20.</b> Modelo uno del consumo energético del transporte aéreo.....                                     | 36 |
| <b>Figura 21.</b> Modelo dos del consumo energético del transporte aéreo .....                                    | 37 |
| <b>Figura 22.</b> Modelo tres del consumo energético del transporte aéreo .....                                   | 37 |
| <b>Figura 23.</b> Gráfica de comparación de parámetros de los modelos del transporte aéreo .....                  | 38 |
| <b>Figura 24.</b> Modelo uno de las emisiones de gases de efecto invernadero .....                                | 40 |
| <b>Figura 25.</b> Modelo dos de las emisiones de gases de efecto invernadero .....                                | 41 |
| <b>Figura 26.</b> Modelo tres de las emisiones de gases de efecto invernadero .....                               | 41 |
| <b>Figura 27.</b> Gráfica de comparación de parámetros de los modelos de las emisiones de GEI .....               | 42 |

# **ANÁLISIS DEL BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL COMO HERRAMIENTA PARA PROCESOS DE DESCARBONIZACIÓN EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE, EVALUACIÓN DE MÉTODO Y ESCENARIOS SOSTENIBLES**

## **Resumen**

El análisis de un sector consumidor de energía es importante para el país, en este caso el sector del transporte, el cual proporciona información sobre el consumo energético que esta utiliza a través de los años y gracias a esto se pudo conocer las emisiones de gases de efecto invernadero que emite. Al llevar a cabo una investigación detallada sobre los datos históricos del balance energético nacional en este sector, con énfasis en sus modos aéreo, terrestre y marítimo, así como en las emisiones asociadas, esta investigación ayudo a brindar una comprensión profunda de la evolución pasada de dicho sector. Utilizando los datos históricos reales como punto de partida y con ello se realizaron pronósticos para un período futuro. La implementación del modelo ARIMA en matlab facilitó la evaluación de diversas configuraciones, permitiendo así identificar el modelo más efectivo. Este se basó en parámetros clave, incluyendo AIC, BIC, P-value y T-statistic, estableciendo una base sólida para la identificación del modelo óptimo. Al escoger el modelo considerado el mejor y más apropiado para proyectarse como adecuado en los años venideros.

***Palabras claves:*** consumo energético, transporte, ARIMA, pronóstico, modelo.

## **Abstract**

The analysis of an energy consuming sector is important for the country, in this case the transportation sector, which provides information on the energy consumption that it uses over the years and thanks to this it was possible to know the emissions of greenhouse gases. greenhouse effect it emits. By carrying out detailed research on the historical data of the national energy balance in this sector, with emphasis on its air, land and maritime modes, as well as the associated emissions, this research helped to provide a deep understanding of the past evolution of said sector. Using actual historical data as a starting point and with this, forecasts were made for a future period. The implementation of the ARIMA model in matlab facilitated the evaluation of various configurations, thus allowing the most effective model to be identified. This was based on key parameters, including AIC, BIC, P-value and T-statistic, establishing a solid foundation for the

identification of the optimal model. By choosing the model considered the best and most appropriate to project itself as adequate in the coming years.

**Keywords:** energy consumption, transportation, ARIMA, prediction, model

## **Introducción**

En el panorama actual la transición hacia una matriz energética más sostenible y la descarbonización del sector del transporte se han convertido en una prioridad ineludible. La dependencia histórica de combustibles fósiles en este sector ha impulsado la necesidad de replantear fuentes y formas de consumo de energía. Debido a ello, el análisis del balance energético nacional se erige como una herramienta esencial para comprender la dinámica actual de la energía y diseñar estrategias efectivas de descarbonización. Para entender y prever escenarios futuros, se plantea la implementación de un modelo autorregresivo con media móvil denominado ARIMA el cual tiene un enfoque estadístico de series temporales, que se presentan como una herramienta idónea para capturar patrones y tendencias. Este enfoque permitirá analizar y prever de manera eficiente cómo las variables relacionadas con la energía evolucionarán a lo largo del tiempo.

La implementación del modelo se llevará a cabo con el respaldo de herramientas como Matlab, que facilita la manipulación avanzada de datos y el análisis estadístico, así mismo el análisis numérico desempeñará un papel fundamental en la interpretación de resultados y la validación de escenarios futuros.

La fuente primaria de información será el balance energético del Ecuador, que abarca datos cruciales sobre la producción, consumo y distribución de energía.

Con lo ya mencionado esta investigación ayudara a anticipar y comprender los posibles escenarios que el sector del transporte ecuatoriano enfrentaría en un contexto de descarbonización eléctrica. Al integrar herramientas avanzadas, análisis estadístico y datos precisos del balance energético, en busca de ofrecer una contribución significativa a la planificación estratégica y sostenible del transporte en Ecuador. Además, este enfoque innovador pretende ser un recurso esencial para la transformación hacia una movilidad más limpia y eficiente.

Desde la perspectiva del transporte, es fundamental examinar la congestión del tráfico y el incremento en el número de automóviles, debido a que están relacionados con problemas que afectan tanto áreas urbanas como suburbanas lo cual agrava la expansión urbana desordenada y el exponencial crecimiento de la población. [13] .

Gracias aquellos factores existe exceso de tráfico y la constante necesidad de desplazarse, los cuales han concebido problemas sociales de infraestructura, de tiempo y de cobertura [12].

En Ecuador, aproximadamente el 77,80 % de la población habita en zonas urbanas y se considera que para el 2030 alcance el 80,60 %. Según datos del Instituto Ecuatoriano de Estadística y Censos en el 2018, la población de Ecuador era de 17 millones de personas, ese mismo año la cifra total de vehículos registrados fue de 2 403 651 unidades [13]



**Figura 1.** Análisis del balance energético en el sector del transporte hasta sus proyecciones a futuro.

### Antecedentes

El trasfondo de este tema se remonta a décadas de dependencia ininterrumpida del sector del transporte en combustibles fósiles, principalmente gasolina y diésel. Esta dependencia ha sido alimentada por políticas energéticas que históricamente han favorecido la accesibilidad y la asequibilidad de estos combustibles, conduciendo a la proliferación de vehículos altamente intensivos en carbono. La infraestructura de transporte existente ha sido moldeada por estas elecciones históricas, creando desafíos significativos para la implementación de tecnologías más limpias. Aunque la conciencia sobre los impactos ambientales ha aumentado, los esfuerzos para descarbonizar el transporte se han visto enfrentados a obstáculos institucionales, financieros y tecnológicos. Este contexto resalta la complejidad del desafío y la necesidad de abordar no solo los aspectos técnicos, sino también los factores políticos y sociales para lograr una transformación efectiva hacia un sistema de transporte más sostenible [1].

Es esencial para garantizar el abastecimiento energético en el futuro, tanto en términos de electricidad como en la industria de los hidrocarburos, y esto a su vez, influye directamente en el mejoramiento de la calidad de vida de la población. Un uso racional, planificado y estratégico de la energía no solo beneficia la producción en el ámbito comercial e industrial, sino que igualmente se traduce en progreso y comodidad en los hogares. Además, contribuye a mejorar la seguridad gracias a una mejor gestión y uso del alumbrado público [6]. Del mismo modo, en el país la tasa promedio de crecimiento del PIB fue del 5,73% entre el período 2010-2019. Por ende, se necesita el desarrollo de un sector energético de alta calidad para que de esta manera garantice un desarrollo económico nacional sostenible [8].

### **Problema**

El cambio climático es un problema grave que enfrenta la humanidad, debido a las grandes concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por las distintas actividades que se realizan en el día a día y generan consecuencias ambientales de gran magnitud (alteraciones en ecosistemas, sequías, incendios, entre otros) [2]

En Ecuador las emisiones de CO<sub>2</sub> durante 2021 han crecido 7,108 megatoneladas, un 20,89% respecto a 2020. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en ese año han sido de 41,141 megatoneladas, con lo que Ecuador es el país número 124 del ranking de países por emisiones de CO<sub>2</sub> [3].

Por lo cual la energía renovable desempeña un papel importante para lograr una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. En particular debemos prestar atención al efecto de una reducción de la proporción de energía fósil, así como de una mejora de la eficiencia de esta. Por ello se debe controlar las emisiones de CO<sub>2</sub> incluso en escenarios más sostenibles, con la combinación y con un aumento del uso de energías renovables, con una mejora de la estructura sectorial productiva [4].

Debido a esto el país requiere debatir los aspectos positivos y negativos relacionados con el uso de energías renovables, con el fin de aprovechar lo positivo como la reducción de emisiones de gases efecto invernadero y otros contaminantes, y avanzar hacia un sistema de transporte más sostenible y respetuoso con el medioambiente y también evitar o reducir los aspectos negativos como el mantenimiento de la congestión vehicular y la siniestralidad en las vías [5].

### **Justificación**



De acuerdo con la Constitución del Ecuador se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover un desarrollo sostenible, ya que este se alinea con el compromiso del país de proteger el medio ambiente y garantizar un ambiente sano y ecológicamente equilibrado para sus ciudadanos por ello se contribuye a mitigar el cambio climático y a mejorar la calidad del aire, lo que impacta positivamente en la salud de la población y en la preservación de los recursos naturales. De ahí la importancia de la transición hacia una sociedad con bajas emisiones de carbono en el futuro, considerando las circunstancias actuales y las necesidades de desarrollo del país.

El análisis del balance energético nacional proporciona información clave sobre el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del transporte, lo que permite identificar áreas de mejora y desarrollar estrategias efectivas para reducir las emisiones.

Al utilizar el análisis del balance energético ecuatoriano como herramienta para procesos de descarbonización en el sector del transporte, se pueden identificar las áreas de mayor consumo de energía y las fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero. Por ende, esto facilita el desarrollo de estrategias y políticas específicas para reducir las emisiones en el sector del transporte, como la promoción de vehículos eléctricos, la mejora de la eficiencia energética en los sistemas de transporte público y la implementación de infraestructuras de carga para vehículos eléctricos, lo que a su vez puede generar empleo local y mejorar la economía del país.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Analizar el balance energético nacional como herramienta para procesos de descarbonización en el sector del transporte mediante evaluación de método y escenarios sostenibles.

### **Objetivos específicos**

- Analizar el balance energético nacional, incluyendo la identificación de las principales fuentes de energía utilizadas en el país y la evaluación de la demanda energética específica en el sector del transporte.

- Desarrollar los métodos y enfoques disponibles para llevar a cabo la descarbonización en el sector del transporte, con el fin de determinar su efectividad y aplicabilidad en el contexto nacional.
- Evaluar modelos de escenarios sostenibles de descarbonización para el sector del transporte, considerando diversas combinaciones de tecnologías y políticas, con el objetivo de proporcionar una visión clara de las posibles trayectorias de descarbonización a largo plazo y su viabilidad en términos de sostenibilidad.

## **Capítulo I**

### **1. Marco Teórico**

#### **1.1 Balance Energético Nacional**

El Balance Energético Nacional es un documento necesario tanto para aquellos que toman decisiones como también para los representantes de los sectores productivos, investigadores y ciudadanos que estén interesados en la situación energética del país [6]. De igual modo desempeña un papel fundamental como fuente de información de referencia, herramienta de planificación y facilitador de diálogo en lo que concierne a la situación energética del país [7].

##### ***1.1.1 Consumo de Energía***

Según el BEN del 2020 [9] la demanda total de energía en el país experimentó un aumento del 14,3% pasando de 72,7 millones de unidades de Energía Base de Petróleo (BEP) en 2010 a 83,1 millones BEP en 2020. Siguiendo la tendencia histórica, el sector del transporte se destacó como el principal consumidor de energía, con un promedio de 43 millones de BEP en la última década. Posteriormente en el sector industrial se registró con un promedio de 14,7 millones de BEP en el mismo lapso. En última instancia, la tercera mayor necesidad de energía provino del sector residencial, con una media de 11,9 millones de BEP.

##### ***1.1.2 Fuentes de energía***

Se dividen en dos categorías las primarias y secundarias. Las primarias se definen como energía en su estado natural, es decir, no existe transformación química ni física. Esta se clasifica en dos grupos, las energías no renovables tales como combustibles fósiles carbono, petróleo, gas natural y por otra parte las renovables como energía eólica, solar, geotérmica, biomasa, madera y agua [10]. En cambio, las secundarias son aquellas que

son adquiridas a partir de la transformación de las primarias tales como gasolina, diésel y electricidad [11].

## ***1.2 Sector del transporte***

Este sector desempeña un papel económico importante en el mundo. Los combustibles más significativos que utilizan hoy en día provienen de fuentes fósiles no renovables [14]. El petróleo ocupa un papel importante como el principal combustible, ya que más del 94 % de la energía demandada para el transporte se obtiene de este, mientras que alrededor del 3 % proviene de gas natural y otros combustibles; el 2 % de biocombustibles; y apenas el 1 % de electricidad [15]. Al ser este el más utilizado en el ámbito del transporte su continuo predominio se fundamenta en diversas razones: su elevada densidad energética, su competitividad en términos de precio en comparación con otras opciones, y el fenómeno de "lock-in" tecnológico, que implica una dependencia arraigada en las tecnologías e infraestructuras de transporte existentes, presentando desafíos significativos para su sustitución a gran escala. Dada la importancia crucial de la movilidad como una de las principales áreas de consumo de combustibles fósiles es imperativo que la región examine detalladamente sus patrones de consumo de energía y busque mejoras significativas en la eficiencia energética en el entorno de la movilidad [16].

De igual modo, como predominante consumidor de combustibles fósiles, este sector es el segundo mayor emisor de emisiones de dióxido de carbono en el mundo, lo que es una de las causas del calentamiento global [17]. De la misma forma ocasiona la contaminación en las áreas metropolitanas y paralelamente es una fuente de millones de accidentes cada año [15].

La industria automotriz se esfuerza por optimizar la eficiencia del combustible y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, el manejo de diferentes combustibles como biodiesel, metanol e hidrógeno se considera una alternativa prometedora. Como elemento más abundante, el hidrógeno se considera un portador de energía adecuado para aplicaciones de movilidad y sistemas de pilas de combustible estacionarias [17]. Igualmente, este sector es una de las fuentes principales de contaminación que se vinculan directamente con la salud por sus altas concentraciones de partículas finas (PM), ozono y dióxido de nitrógeno. También las operaciones con transporte producen emisiones de gases de escape, de vapores de combustible, polvo de la carretera y desgaste de partículas de frenos y neumáticos. Otros efectos que debemos

tomar en cuenta sobre la salud son el ruido y lesiones provocadas por accidentes de tráfico. Las emisiones globales del tráfico están controladas con distintos factores, incluido el desarrollo económico, que a menudo aumenta la propiedad de vehículos personales y operaciones de carga; cambios en la calidad del combustible; e imponer límites de emisiones a los vehículos y los motores los cuales cumplen normas medioambientales cada vez más estrictas [18]

Por ello se debe proponer estrategias de eficiencia energética enfocadas en el sector transporte [19]. Tales opciones como la sustitución de los sistemas de transporte público convencionales por autobuses eléctricos [20]. Como menciona García Olivares (2018) la eficiencia global de la flota de vehículos se ve mejorada mediante la electrificación, ya que los motores eléctricos exhiben una eficiencia considerablemente mayor en comparación con los motores de combustión interna [15].

### ***1.2.1 Importancia del sector del transporte***

La relevancia de este se encuentra en su impacto dinamizador, el cual afecta a todas las industrias dentro de una economía. Desde el agricultor local que transporta sus cosechas en animales de carga para su venta en el mercado, hasta el magnate industrial que exporta sus productos a través de barcos y aviones, por ende, cada actividad económica requerirá en algún punto, el desplazamiento de bienes o personas. Evidentemente, el ámbito donde el transporte adquiere mayor importancia es en el ámbito del comercio, tanto a nivel nacional como internacional, ya que facilita el intercambio entre mercados, optimizando el proceso de movilización [21]

Por ello la atención dedicada al transporte refleja el potencial económico de un país, ya que no solo se necesita una sólida capacidad productiva para alcanzar el desarrollo económico, sino también la infraestructura y los medios necesarios para trasladar eficientemente los productos a cualquier parte del mundo [22].

### ***1.2.2 Tipos de transporte***

Los medios de transporte se establecen como el modo en la que se movilizan los productos o mercaderías de un punto de origen hasta su destino, los principales son conocidos como terrestre, aéreo y marítimo [23]

- Terrestre: Este es un subgrupo importante del transporte que incluye la carretera y el ferrocarril. El transporte por carretera se clasifica además en transporte de pasajeros y de mercancías; el de pasajeros se caracteriza por diferentes modos

según el medio utilizado, por ejemplo, transporte en vehículos de motor, en masa o en bicicleta; las instalaciones por las cuales transitan involucran carreteras, puentes, túneles y pasos elevados completos. El transporte ferroviario también se puede clasificar en transporte de pasajeros y transporte de mercancías; estos se trasladan por carreteras internacionales, túneles, puentes y patios de ferrocarril. [24]

- **Aéreo:** La demanda aérea tiene una influencia enorme en el desarrollo de los planes aeroportuarios tanto respecto en la zona de aire; en pistas, calles de rodaje, plataformas y en el lado de piso como zonas de embarque/aterrizaje y salas de espera. De tal manera, esto hace que dependa la cantidad de viajeros durante el período del informe, generalmente un año o más para ese propósito. Asimismo, los servicios han cambiado aceleradamente en los últimos años, tanto en términos de constitución y costos financieros, porque se han producido diversas empresas y alianzas, junto con el surgimiento de nuevos desafíos en el mercado. [25]
- **Marítimo:** Este tipo de transporte es de vital importancia económica, no sólo para el comercio mundial de bienes el cual estima que entre el 90 al 95 por ciento del comercio internacional diario de bienes en volumen y peso se transporta por este medio, sino también fundamental para la parte del servicio. A su vez este es una de las pocas industrias verdaderamente globales, que presta servicios a todos los continentes, y la movilidad única de los bienes de capital en barcos, así como la existencia de mercados más liberales que en muchos otros sectores, han hecho que se convierta en internacional como uno de los principales sectores industriales globalizados en términos de mercados, tecnología, inversión, capital y mano de obra [26]

### ***1.2.3 Nacional***

Según el balance energético del 2015 se evaluó que el 46% de la energía demandada es utilizada por el sector del transporte. En su mayoría esta corresponde al transporte de mercancías, siendo el diésel con el 45%; seguido de gasolina el 43% las energías mayormente consumidas [27]. Por esta razón es vital tomar medidas de eficiencia energética y sustituir los mismos [28].

Según el Balance Energético Nacional del 2020 [29] la demanda total de energía en el país experimentó una disminución del 12,4%. En el sector del transporte se había

registrado la principal y significativa reducción del 18,7%, aunque mantuvo su posición como el más alto consumidor con un 45,4% del total. Le siguieron en importancia los sectores industrial y residencial, con participaciones del 17,4% y 15,7% respectivamente. Los combustibles diésel y gasolina, junto con la electricidad; continuaron siendo las fuentes energéticas más utilizadas en el país. Se observó una disminución del 14,2% en el consumo de diésel; el 21,4% en el de gasolina y del 1,8% en el de electricidad. El aporte de fuentes renovables a la matriz energética representó el 9,4% del consumo total en el país, experimentando un incremento del 8,7% en comparación con el año 2019. En el año 2020, las emisiones provenientes del sector energético experimentaron una reducción del 13,7% con respecto a 2019, siendo esta disminución principalmente atribuida a la caída en el consumo de energía en el sector del transporte.

#### ***1.2.4 Mundial***

Para el desarrollo económico y social de América Latina, el sistema de transporte es fundamental, aunque la tasa de crecimiento actual no es sostenible. Aunque los modos de transporte tanto públicos y no motorizados equivalen a la mayor cantidad de desplazamientos de pasajeros, se registra un importante aumento en el uso de vehículos propios y motocicletas. En el año 2010 se observa, por cada niño nacido, se matricularon 2,5 veces un automóvil nuevo.

Como efecto, en el futuro se prevé que aumente la contaminación, los accidentes, los problemas de salud, los problemas energéticos y la emisión de gases. La OMS proyecta que la quinta causa de muerte en 2030 serán los accidentes de tránsito con más de 2 millones de víctimas. Al mismo tiempo, la Agencia Internacional de Energía refleja que el consumo de energía proveniente del transporte crecerá en un 50% para 2030 y en un 80% para 2050 [30]

#### ***1.2.5 Ventajas y desventajas***

Como principal medio de transporte tenemos a los autobuses que tiene como ventaja el diseño específico para transportar a una cantidad considerable de pasajeros y capaz de maniobrar en carretera; impulsado por una fuente de energía almacenada o producida a partir del combustible almacenado a bordo. Sin embargo, tienen desventajas como el bajo respeto al medio ambiente durante el uso, alto desgaste, ruido, el uso de este por largos periodos en las carreteras urbanas conduce a su baja maniobrabilidad y por consecuencia a atascos y un mayor potencial de accidentes de tráfico. Otro medio que cabe mencionar

es el metro, varios de sus beneficios pueden ser su alta velocidad de recorrido, bajo nivel de ruido para el medio ambiente y falta de intersección con otros modos de transporte. Sus desventajas son altos costos de construcción y operativos, como posibles problemas de seguridad y la posibilidad de una rápida propagación de enfermedades respiratorias [31].

Al hablar del medio marítimo este usa los ingresos del carbono, que abarca múltiples ventajas, ya que contribuye a la efectividad climática como capacidad para abordar cuestiones de equidad. Pero también contienen desventajas que son basadas en rutas, ya que socavan los incentivos para invertir en embarcaciones con cero o bajos GEI e infraestructura terrestre de combustible con cero o bajos GEI [32].

Otros medios que debemos tomar en cuenta son los vehículos acuáticos, como principales ventajas son su ausencia de intersección con otros modos de transporte y el uso de la superficie del agua. Al mismo tiempo, las desventajas son su baja velocidad, los accidentes en el agua y la alta dependencia del clima [31].

El transporte aéreo hoy en día es el modo más joven y rápido de viajar, gracias al traslado a los pasajeros a distancias de más de miles de kilómetros, debido a ello algunos de sus beneficios son: su alta velocidad, tanto pasajeros como mercancías fácilmente se transportan de un lugar a otro y es conveniente enviar mercancías costosas, ligeras y perecederas. Entre las desventajas se incluyen costos operativos elevados, mayor susceptibilidad a accidentes, riesgos significativos para los pasajeros con pequeños errores y una mayor posibilidad de secuestros de aviones [33].

### ***1.3 Descarbonización***

Se puede definir como un conjunto de medidas específicamente dirigidas a reducir el CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero [34]. Este también hace referencia al reemplazo de los combustibles fósiles más contaminantes entre ellos los derivados del petróleo y los menos eficientes tal como carbón por alternativas menos agresivas como el gas natural y la biomasa, basándose en una sustitución gradual. Esto debe complementarse con la generación de electricidad mediante: tecnologías renovables, eficiencia energética y un menor consumo de energía [35].

#### ***1.3.1 Impacto***

Cuando los combustibles se queman para producir energía, estos emiten cantidades variables de CO<sub>2</sub> y otras sustancias, incluidos diversos contaminantes. Las emisiones

resultantes dependen de las características de los combustibles individuales y de la tecnología utilizada para quemarlos. A medida que existe más carbono en la estructura molecular, más se libera este elemento a la atmósfera. A su vez, cuando se queman combustibles fósiles el carbono que de otro modo se habría almacenado durante miles o millones de años continúa circulando en la atmósfera [36].

Existen varias estrategias fundamentales para la descarbonización el cual permitirá emisiones netas cero, las cuales son: corregir el rendimiento energético y de materiales, reducir el contenido de carbono en las fuentes de energía y los materiales y modificar los usos finales en torno a éstos llevando a estos a las reducciones de GEI mediante el beneficio del piso y procesos técnicos que resultan en emisiones negativas [37]

## **1.4 Metodología**

### ***1.4.1 Arima***

El modelo ARIMA es un método que puede pronosticar un solo producto en producción, siempre que la señal de las series temporales contenga patrones autosimilares en el tiempo, que continúen en el futuro [38]. Esta se ejecuta para la utilización de datos previos, incluyendo tanto los puntos observados como los errores pasados en un modelo de regresión, con el propósito de realizar predicciones de los valores en un momento determinado [39]

Adicionalmente permite identificar tendencias, estacionalidades y patrones cíclicos, proporcionando así una base robusta para la proyección y evaluación de escenarios futuros [40]

Esta metodología está relacionada con la necesidad de modificar la tecnología utilizada, en un escenario en el que, el sector del transporte emita menos gases de efecto invernaderos. Por ello el método ARIMA definirá la forma de modelo apropiado, comenzando con la determinación de si el modelo es estacionario o no.

Posteriormente se analizan los criterios de evaluación, comparando las series desarrolladas. Por tanto, para realizar proyecciones mediante el método son necesarias algunas simulaciones y una posterior elección de esta [41].

### ***1.4.2 Proyecciones de datos***

Lo primordial en este apartado es analizar los datos mediante pronósticos, en un corto mediano plazo de 8 años comprendidos entre 2023 y 2030, del sector del transporte



nacional [42]. Específicamente se busca establecer un diagnóstico de lo que existe actualmente en Ecuador, a partir del análisis del balance energético, métodos y sus escenarios sostenibles para la descarbonización [43]. Para ello se evaluará diversos escenarios que permitan el uso adecuadamente de los recursos energéticos, relacionando diferentes elementos como la matriz energética y su efecto en el ambiente. [44], por ende, se considerará como una herramienta fundamental las energías renovables ya que estos son recursos inagotables, el cual conducen a un sistema energético sostenible [45].

## **Capítulo II**

### **2. Desarrollo**

#### **2.1 Descripción de la solución**

El transporte desempeña un papel esencial en todas las industrias, facilitando el traslado eficiente de bienes y servicios entre diferentes puntos. Entre los beneficios fundamentales se encuentran la reducción de costos, la optimización de la eficiencia logística, la apertura de nuevos mercados y factores que contribuyen al crecimiento económico. Además, el transporte facilita la conexión global, fomentando la colaboración y el intercambio comercial a nivel internacional. [46].

En el presente trabajo se va a brindar un modelo óptimo de pronósticos para la descarbonización del transporte durante el periodo 2023-2030. El análisis comienza con datos de años anteriores extraídos del BEN, sobre el consumo energético nacional del transporte y sus principales modos, así como datos relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero. Posteriormente, utilizando MATLAB probaremos varios modelos ARIMA para pronosticar y determinar cuál de ellos es el más eficaz, gracias a esto se obtendrán datos importantes, incluyendo métricas relevantes, que serán una guía fundamental en la toma de decisiones. Finalmente, se realizará una evaluación exhaustiva para identificar el mejor modelo y así determinar su efectividad y aplicabilidad en años futuros.

#### **2.2 Datos de consumo sector del transporte**

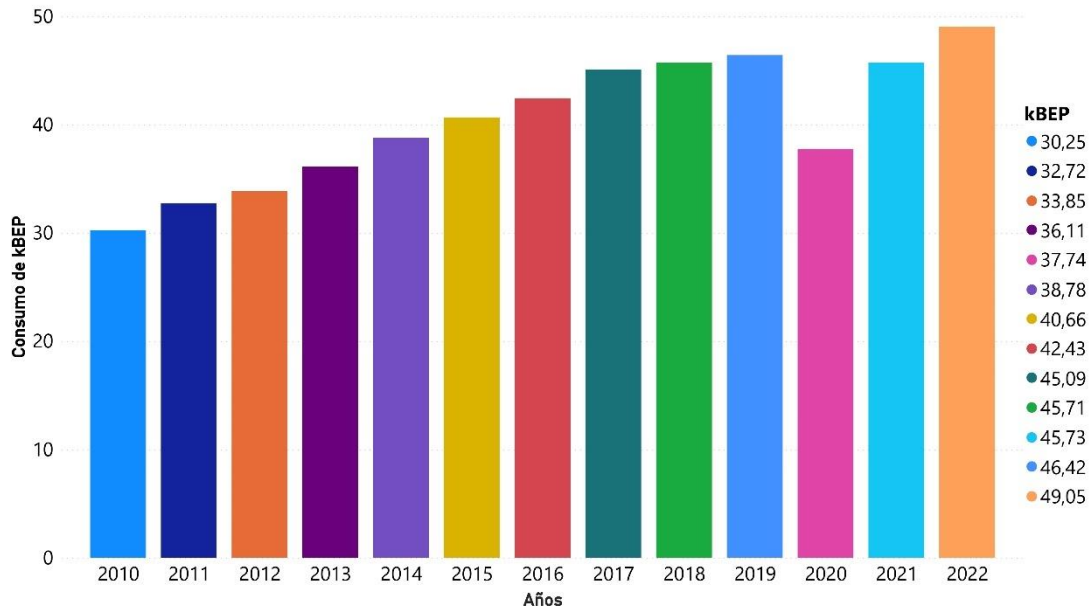
##### ***2.2.1 Consumo energético sector transporte 2010-2022***

En la Tabla 1. se exhibe datos anuales del consumo de energía total en el sector del transporte, abarcado del año 2010 al 2022. Este conjunto de información es esencial para evaluar la demanda energética global de las actividades de transporte a lo largo del tiempo

**Tabla 1.** Datos del sector del transporte 2010-2022

| <b>AÑO</b> | <b>Unidad (kBEP)</b> |
|------------|----------------------|
| 2010       | 30.25                |
| 2011       | 32.72                |
| 2012       | 33.85                |
| 2013       | 36.11                |
| 2014       | 38.78                |
| 2015       | 40.66                |
| 2016       | 42.43                |
| 2017       | 45.10                |
| 2018       | 45.71                |
| 2019       | 46.42                |
| 2020       | 37.74                |
| 2021       | 45.73                |
| 2022       | 49.05                |

La Figura 2. proporciona datos recopilados a lo largo de un periodo de 13 años sobre el sector del transporte y su consumo energético, expresado en kBEP. Por otro lado, se resalta que el año con el mayor consumo energético es 2022, alcanzando un 49,05 de kBEP, en contraste con el año de menor consumo, que fue 2010, registrando un 30,25 de kBEP. Este análisis indica un incremento notable en el consumo anual de energía durante ese periodo.



**Figura 2.** Uso de la energía del sector transporte (kBEP)

### 2.2.2 Consumo energético del transporte terrestre 2013-2022

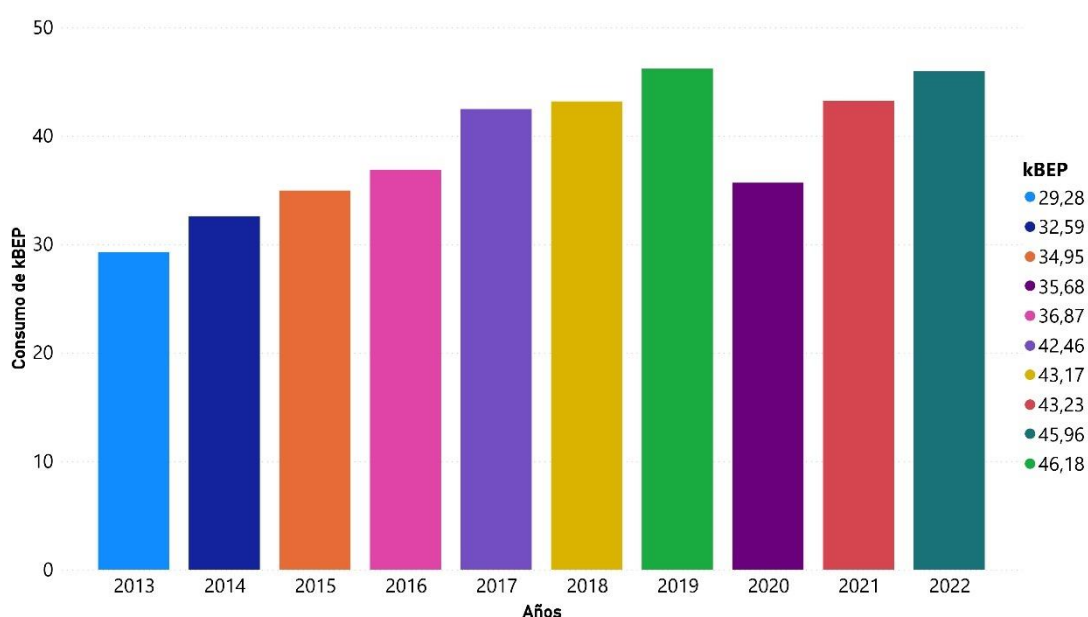
En la Tabla 2. se exhibe los datos anuales del consumo de energía en el transporte terrestre desde 2013 hasta 2022. Estos datos son de suma utilidad para analizar patrones, tendencias y cambios a lo largo del tiempo en este modo de transporte.

**Tabla 2.** Datos del transporte terrestre 2013-2022

| <b>AÑO</b> | <b>Unidad (kBEP)</b> |
|------------|----------------------|
| 2013       | 29.28                |
| 2014       | 32.59                |
| 2015       | 34.95                |
| 2016       | 36.87                |
| 2017       | 42.46                |
| 2018       | 43.17                |
| 2019       | 46.18                |
| 2020       | 35.68                |

|      |       |
|------|-------|
| 2021 | 43.23 |
| 2022 | 45.96 |

La Figura 3. presenta datos recopilados durante el periodo comprendido entre 2013 y 2022 acerca de la energía consumida en el transporte terrestre, expresado en kBEP. El año 2019 tuvo un mayor consumo alcanzando el 46,18 de kBEP, en comparación con el año de menor consumo, que fue 2013, con un registro de 29,28 de kBEP. No obstante, es notable observar una disminución en el año 2020, situándose en 35,68.



**Figura 3.** Uso de la energía del transporte terrestre (kBEP)

### 2.2.3 Datos del consumo energético del transporte marítimo 2013-2022

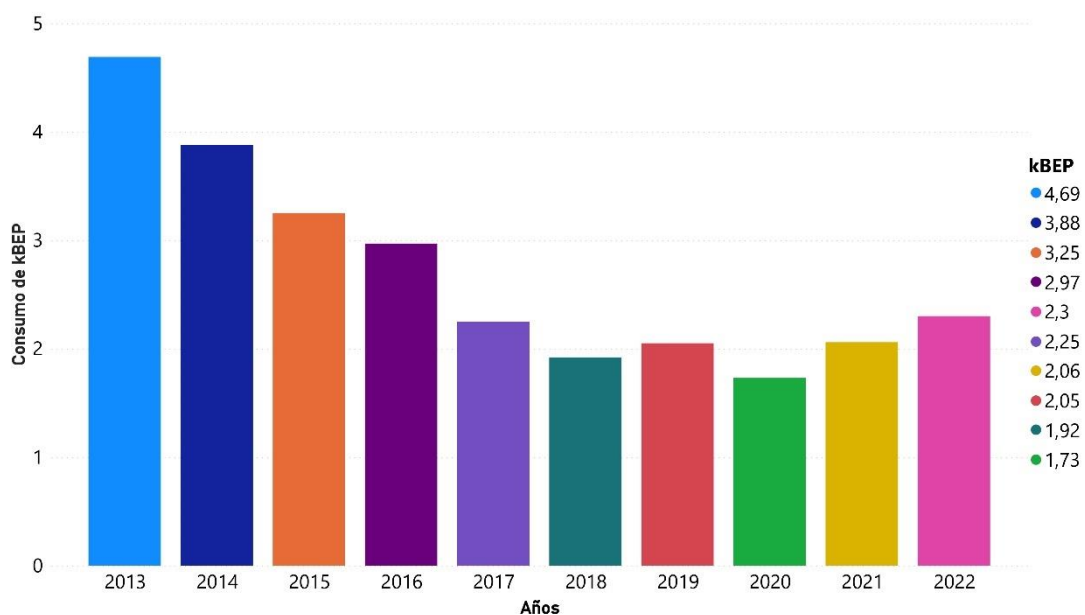
En la Tabla 3. se presenta los datos anuales del consumo de energía en el transporte marítimo desde 2013 hasta 2022. Estos datos son de suma utilidad para analizar patrones, tendencias y cambios a lo largo del tiempo en este modo de transporte.

**Tabla 3.** Datos del transporte marítimo 2013-2022

| AÑO  | Unidad (kBEP) |
|------|---------------|
| 2013 | 4.69          |

|      |      |
|------|------|
| 2014 | 3.88 |
| 2015 | 3.25 |
| 2016 | 2.97 |
| 2017 | 2.25 |
| 2018 | 1.92 |
| 2019 | 2.05 |
| 2020 | 1.73 |
| 2021 | 2.06 |
| 2022 | 2.30 |

La Figura 4. presenta datos recopilados entre 2013 y 2022 sobre la energía consumida en el transporte marítimo, expresado en kBEP. Es relevante señalar que el año con el mayor consumo energético fue 2013 alcanzando el 4,69 de kBEP, en contraste con el año de menor consumo que fue 2020 registrando un 1,73 de kBEP. Sin embargo, es destacable observar que, a lo largo de los años, este consumo ha experimentado una disminución, con la excepción del año 2019, seguido por otra reducción en el año siguiente.



**Figura 4.** Uso de la energía del transporte marítimo (kBEP)

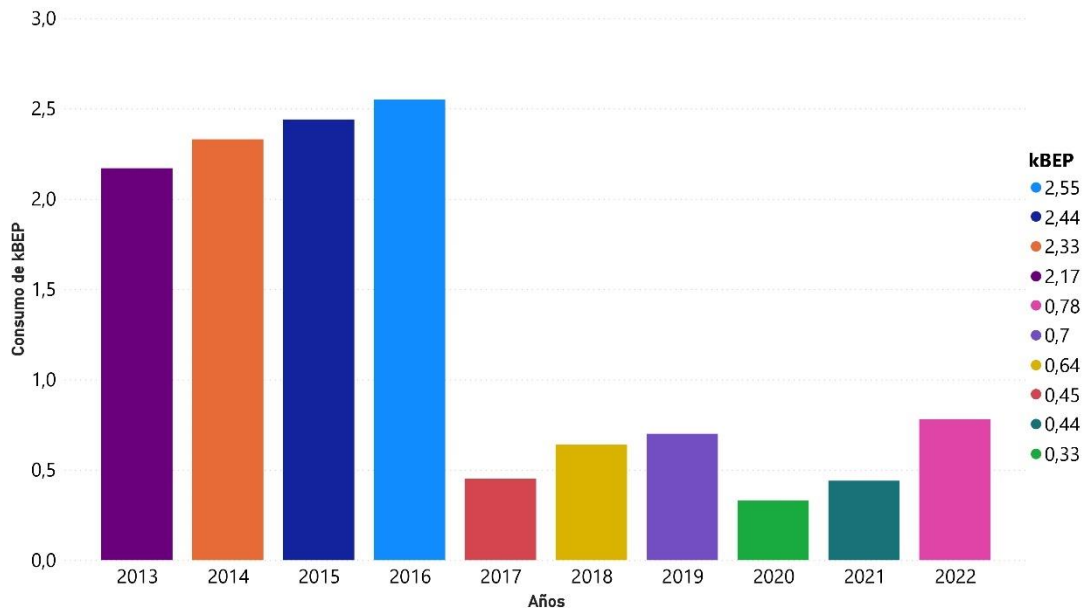
#### **2.2.4 Datos del consumo energético del transporte aéreo 2013-2022**

En la Tabla 4. se observa los datos anuales del consumo de energía en el transporte aéreo desde 2013 hasta 2022. Estos datos son de suma utilidad para analizar patrones, tendencias y cambios a lo largo del tiempo en este modo de transporte.

**Tabla 4.** Datos del transporte aéreo 2013-2022

| <b>AÑO</b> | <b>Unidad (kBEP)</b> |
|------------|----------------------|
| 2013       | 2.17                 |
| 2014       | 2.33                 |
| 2015       | 2.44                 |
| 2016       | 2.55                 |
| 2017       | 0.45                 |
| 2018       | 0.64                 |
| 2019       | 0.70                 |
| 2020       | 0.33                 |
| 2021       | 0.44                 |
| 2022       | 0.78                 |

La Figura 5. presenta información recopilada entre 2013 y 2022 sobre el consumo de energía en el transporte aéreo, expresado en kBEP. El año con el mayor consumo energético fue 2016, alcanzando el 2,55 de kBEP, en contraste con el año de menor consumo, que fue 2020, registrando un 0,33 de kBEP. Por otro lado, se observa que este ha experimentado un patrón el cual al pasar los años este va en incremento o en disminución.



**Figura 5.** Uso de la energía del transporte aéreo (kBEP)

### 2.3 Datos de descarbonización 2010-2022

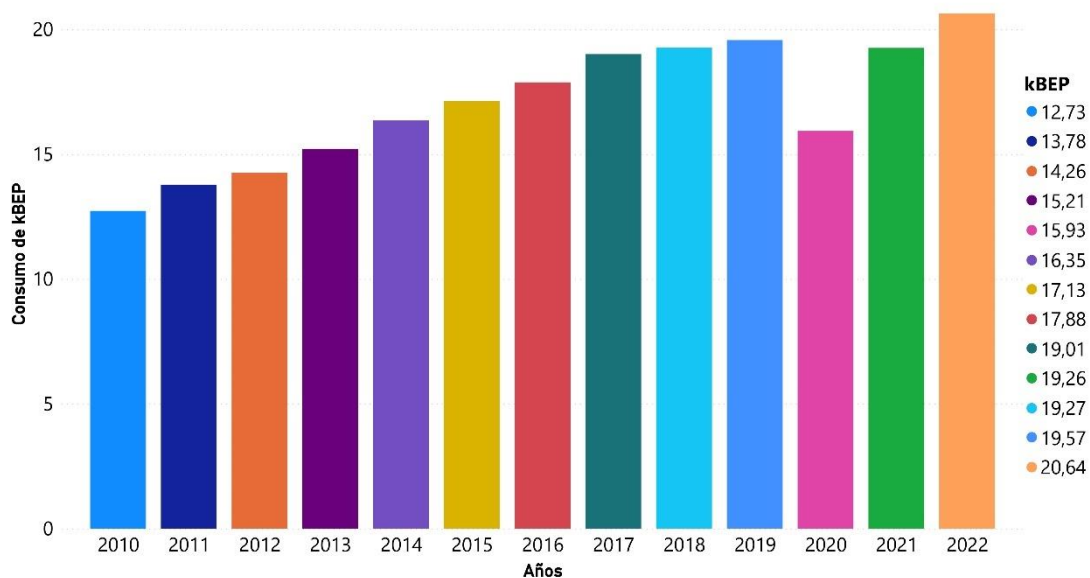
En la Tabla 5. se expone los datos anuales de emisiones de GEI en el sector del transporte, abarcando desde el año 2010 hasta el año 2022. Estos datos son cruciales para evaluar el impacto ambiental directo de las actividades de transporte en términos de cambio climático. Se observan patrones y tendencias que ofrecen información esencial sobre la eficiencia ambiental del sector a lo largo del tiempo.

**Tabla 5.** Datos de las emisiones de GEI

| AÑO  | ktonCO <sub>2</sub> eq |
|------|------------------------|
| 2010 | 12.73                  |
| 2011 | 13.78                  |
| 2012 | 14.26                  |
| 2013 | 15.21                  |
| 2014 | 16.35                  |
| 2015 | 17.13                  |
| 2016 | 17.88                  |
| 2017 | 19.01                  |

|      |       |
|------|-------|
| 2018 | 19.27 |
| 2019 | 19.57 |
| 2020 | 15.93 |
| 2021 | 19.26 |
| 2022 | 20.64 |

La Figura 6. muestra información obtenida a lo largo de un periodo 13 años sobre las emisiones GEI, expresadas en unidades de ktonCO<sub>2</sub>eq, que representa kilotoneladas de equivalentes de dióxido de carbono, esta unidad es comúnmente utilizada para medir las emisiones. Además, se destaca que el año con una cantidad mayor de emisiones es 2022, registrando un 20,64 de kBEP en comparación con el año de menor emisión, 2010, con un 12,73 de kBEP específicamente en el sector del transporte. Este análisis refleja un aumento significativo en las emisiones durante el período mostrado.



**Figura 6.** Emisiones de gases de efecto invernadero (ktonCO<sub>2</sub>eq)

## 2.4 Propuesta de evaluaciones y pronósticos

### 2.4.1 Análisis de datos

En esta sección, al analizar los datos previamente presentados, se utilizan dos unidades específicas de medida. Para el consumo energético, se expresa en la unidad de miles de



barriles equivalentes de petróleo (kBEP). Su función es medir y comparar diversas formas de energía, facilitando una evaluación uniforme de diferentes recursos en términos de su equivalencia con el petróleo.

Por otro lado, las emisiones de gases de efecto invernadero se miden en kilotoneladas de dióxido de carbono equivalente (ktonCO<sub>2</sub>eq). Su propósito es cuantificar y comparar las contribuciones climáticas de distintas fuentes de emisión, permitiendo una evaluación estandarizada de los impactos ambientales asociados con diferentes actividades o sectores.

#### **2.4.2 Pronósticos lineales**

Los pronósticos lineales son estimaciones que se realizan utilizando modelos matemáticos lineales, estos suponen que existe una relación lineal entre las variables involucradas. En las series temporales, los pronósticos lineales implican prever valores futuros basándose en patrones lineales observados en datos históricos.

Con lo anteriormente mencionado el modelo autorregresivo integrado de media móvil ARIMA [47] es un tipo de modelo estadístico utilizado para analizar y predecir series temporales. Este modelo combina componentes auto regresivos (AR), de media móvil (MA) y de integración (I). La ecuación general de este modelo (p, d, q) se detallará a continuación:

$$Y_t = c + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-p} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t$$

Donde:

$Y_t$  es el valor de la serie temporal en el tiempo  $t$ .

$c$  es una constante.

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$  son los coeficientes autoregresivos.

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  son los coeficientes de la media móvil.

$\varepsilon_t$  es el término de error en el tiempo  $tp$ .

El parámetro  $p$  representa el orden de la parte autorregresiva (AR),  $d$  es el orden de diferenciación, y  $q$  es el orden de la parte de media móvil (MA).

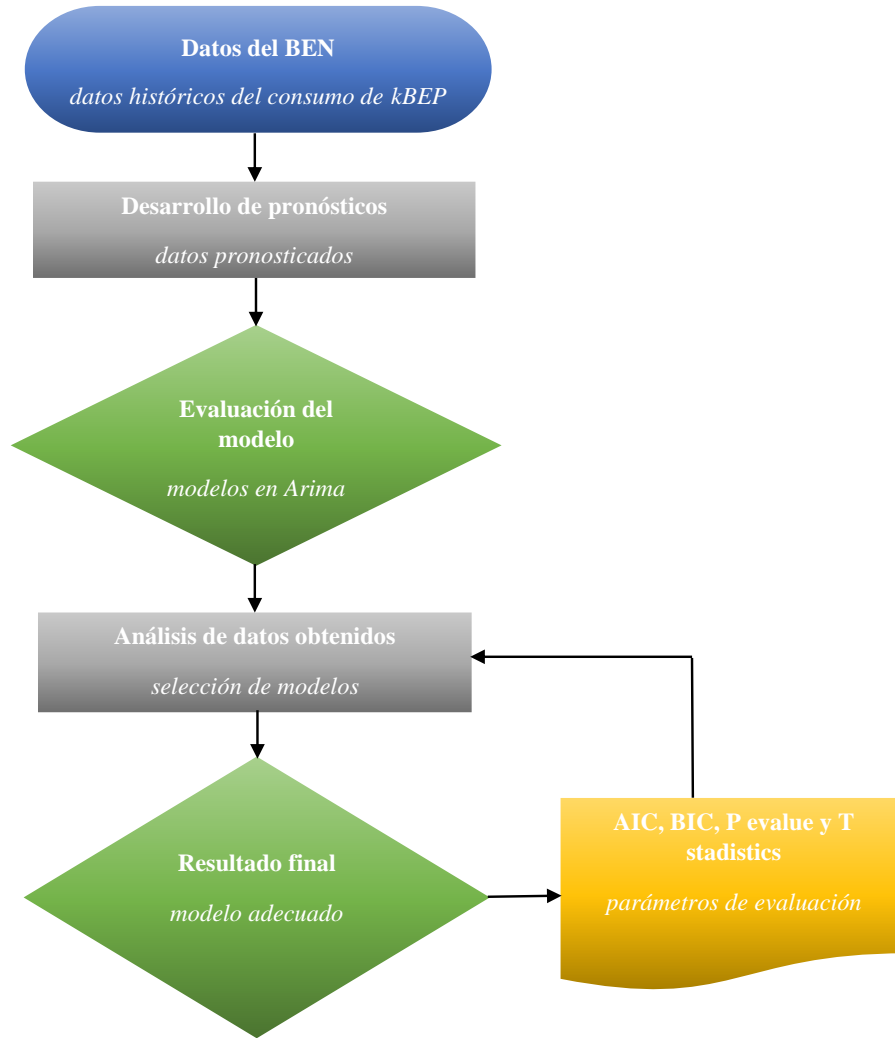
#### **2.4.3 Parámetros del modelo ARIMA**

- BIC (Criterio de Información Bayesiano):  
Esta es una medida utilizada para la selección de modelos estadísticos. El cual nos indica que cuanto menor sea el valor del BIC mejor se considera el modelo. Este se calcula teniendo en cuenta el ajuste del modelo y la complejidad del mismo, favoreciendo modelos que logran un buen ajuste con un menor número de parámetros. [48]
- AIC (Criterio de Información de Akaike):  
El AIC es similar al BIC, este también es utilizado para seleccionar modelos, pero con una diferencia la cual nos hace conocer que este favorece la simplicidad del modelo. Al igual que el BIC, este busca minimizar el valor del AIC. Este se calcula teniendo en cuenta el ajuste del modelo y penalizando modelos más complejos.
- P-value (Valor p):  
El valor p se utiliza para evaluar la significancia estadística de los coeficientes del modelo. Un valor p bajo sugiere que el coeficiente es significativamente diferente de cero.
- 1. T-statistic (Estadístico t):  
El estadístico t se utiliza para evaluar la significancia de los coeficientes. Un estadístico t grande (en valor absoluto) sugiere una mayor significancia del coeficiente.

## **2.5 Flujo de interrelación**

### ***2.5.1 Diagrama de flujo***

La Figura 7. presenta un diagrama de flujo detallado acerca de los pasos de la realización de la investigación, partiendo desde la recopilación de datos del BEN hasta el resultado final el cual es el pronóstico final.



**Figura 7.** Diagrama de flujo

### Capítulo III

#### 3. Análisis de resultados

##### 3.1 Datos de la energía consumida en el sector transporte 2010-2030

En la Tabla 6. se exhibe datos totales anuales de la energía consumida en el sector del transporte, abarcando datos reales desde los años 2010 al 2022 y a partir de aquella información se obtuvieron datos pronosticados entre los años 2023 al 2030.

**Tabla 6.** Datos del sector del transporte 2010-2030

| Datos | Año | Unidad (kBEP) |
|-------|-----|---------------|
|-------|-----|---------------|

|                     |      |       |
|---------------------|------|-------|
|                     | 2010 | 30.25 |
|                     | 2011 | 32.72 |
|                     | 2012 | 33.85 |
|                     | 2013 | 36.11 |
|                     | 2014 | 38.78 |
|                     | 2015 | 40.66 |
| Datos Reales        | 2016 | 42.43 |
|                     | 2017 | 45.09 |
|                     | 2018 | 45.71 |
|                     | 2019 | 46.42 |
|                     | 2020 | 37.74 |
|                     | 2021 | 45.73 |
|                     | 2022 | 49.05 |
|                     | 2023 | 49.68 |
|                     | 2024 | 51.01 |
|                     | 2025 | 52.35 |
| Datos Pronosticados | 2026 | 53.68 |
|                     | 2027 | 55.01 |
|                     | 2028 | 56.35 |
|                     | 2029 | 57.68 |
|                     | 2030 | 59.01 |

### ***3.1.1 Modelo uno de la energía consumida del sector del transporte 2010-2030***

(2 1 2)

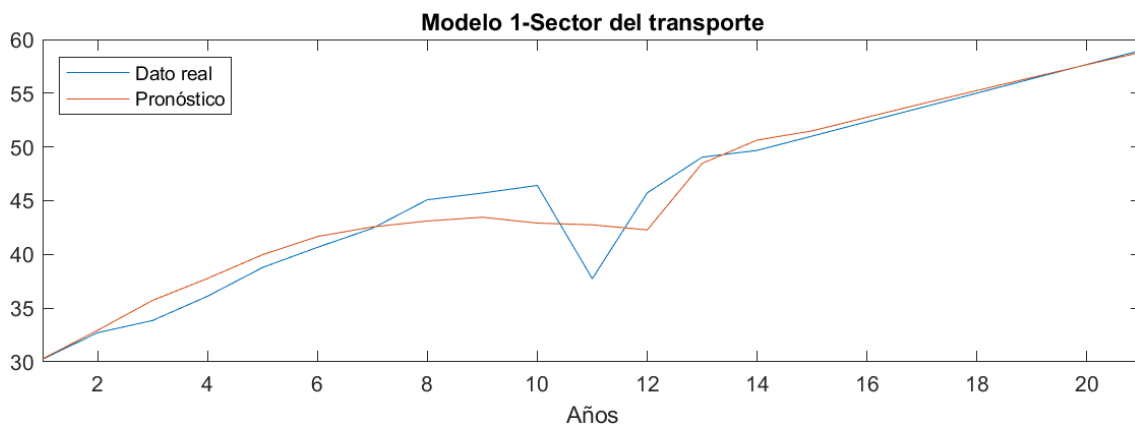
Orden autorregresivo: 2

Grado de integración: 1

Orden de media móvil: 2

$$(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2)(1 - L)y_t = c + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2)\varepsilon_t$$

En la Figura 8, el modelo uno presenta la cantidad de kBEP del sector transporte consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales. Por lo tanto, demuestra un ajuste preciso en sus predicciones.



**Figura 8.** Modelo uno del consumo energético total del sector del transporte

### 3.1.2 Modelo dos de la energía consumida del sector del transporte 2010-2030

$$(4 \ 1 \ 1)$$

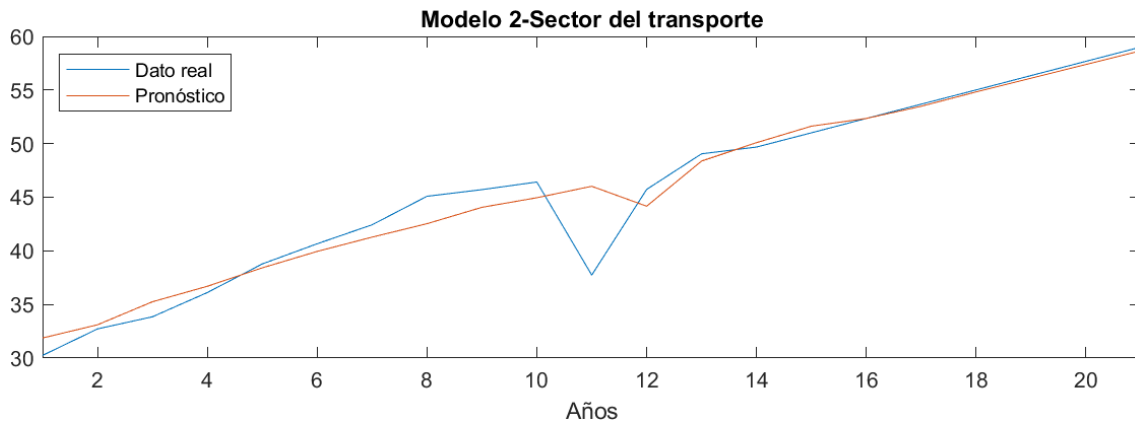
Orden autorregresivo: 4

Grado de integración: 1

Orden de media móvil: 1

$$(1 - \phi_1 L - \dots - \phi_4 L^4)(1 - L)y_t = c + (1 + \theta_1 L)\varepsilon_t$$

En la Figura 9. el modelo dos presenta la cantidad de kBEP del sector transporte consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales. Por lo tanto, demuestra un buen ajuste en sus predicciones, a excepción del año 11 que presenta un notable desajuste.



**Figura 9.** Modelo dos del consumo energético total del sector del transporte

### 3.1.3 Modelo tres de la energía consumida del sector del transporte 2010-2030

$$(4 \ 2 \ 2)$$

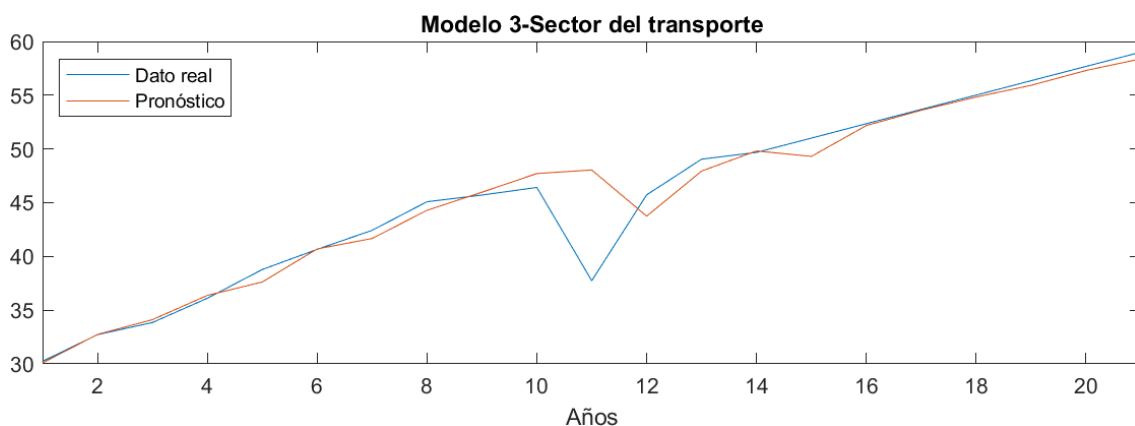
Orden autorregresivo: 4

Grado de integración: 2

Orden de media móvil: 2

$$(1 - \phi_1 L - \dots - \phi_4 L^4)(1 - L)^2 y_t = c + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2) \varepsilon_t$$

En la Figura 10. el modelo tres presenta la cantidad de kBEP del sector transporte consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales. Por lo tanto, demuestra un buen ajuste en sus predicciones, a excepción de los años 10 y 11 que presenta un notable desajuste.



**Figura 10.** Modelo tres del consumo energético total del sector del transporte

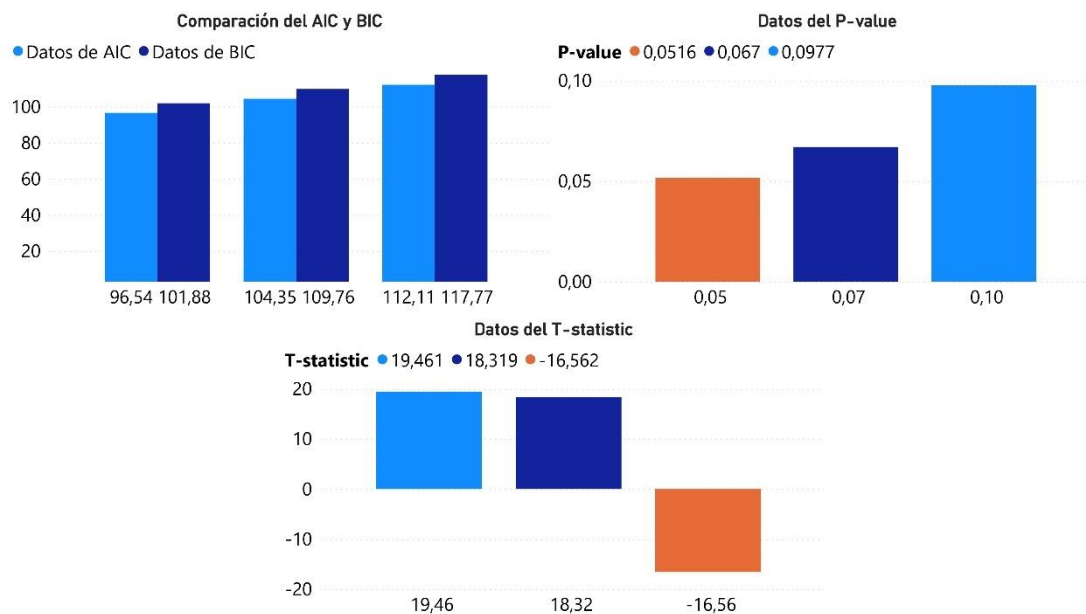
### 3.1.4 Comparación de los tres modelos sector del transporte 2010-2030

De acuerdo con los resultados del modelo ARIMA presentados en la Tabla 7. se comparó elementos fundamentales como el AIC, BIC, T-statistic y el P-value, el cual al analizarlos se demostró que el modelo (2 1 2) obtuvo un mejor desempeño en todos los parámetros mencionados.

**Tabla 7.** Resultados de modelos del sector transporte 2010-2030

| Modelo | AIC      | BIC      | T-statistic | P-value |
|--------|----------|----------|-------------|---------|
| 2 1 2  | 96.5410  | 101.8832 | 19.461      | 0.0516  |
| 4 1 1  | 104.3547 | 109.7629 | 18.319      | 0.0670  |
| 4 2 2  | 112.1057 | 117.7701 | -16.562     | 0.0977  |

La Figura 11. presenta el gráfico de resultados derivados de los tres modelos seleccionados, destacando la comparación entre el AIC y BIC, así como el P-value y el T-statistic.



**Figura 11.** Gráfica de comparación de parámetros de los modelos sector transporte

### 3.2 Datos de la energía consumida del transporte terrestre 2013-2030

En la Tabla 8. se exhibe datos anuales de la energía consumida del transporte terrestre, abarcando datos reales desde los años 2013 al 2022 y a partir de aquella información se obtuvieron datos pronosticados entre los años 2023 al 2030.

**Tabla 8.** Datos del transporte terrestre 2013-2030

| <b>Datos</b>        | <b>Año</b> | <b>Unidad (kBEP)</b> |
|---------------------|------------|----------------------|
| Datos Reales        | 2013       | 29.28                |
|                     | 2014       | 32.59                |
|                     | 2015       | 34.95                |
|                     | 2016       | 36.87                |
|                     | 2017       | 42.46                |
|                     | 2018       | 43.17                |
|                     | 2019       | 46.18                |
|                     | 2020       | 35.68                |
|                     | 2021       | 43.23                |
|                     | 2022       | 45.96                |
| Datos Pronosticados | 2023       | 48.84                |
|                     | 2024       | 50.56                |
|                     | 2025       | 52.29                |
|                     | 2026       | 54.01                |
|                     | 2027       | 55.74                |
|                     | 2028       | 57.46                |
|                     | 2029       | 59.19                |
|                     | 2030       | 60.91                |

**3.2.1 Modelo uno de la energía consumida del transporte terrestre 2013-2030**

(2 1 2)

Orden autorregresivo: 2

Grado de integración: 1

Orden de media móvil: 2



$$(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2)(1 - L)y_t = c + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2)\varepsilon_t$$

En la Figura 11. el modelo dos presenta la cantidad de kBEP del transporte terrestre consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales. Por lo tanto, demuestra un ajuste alto en sus predicciones.

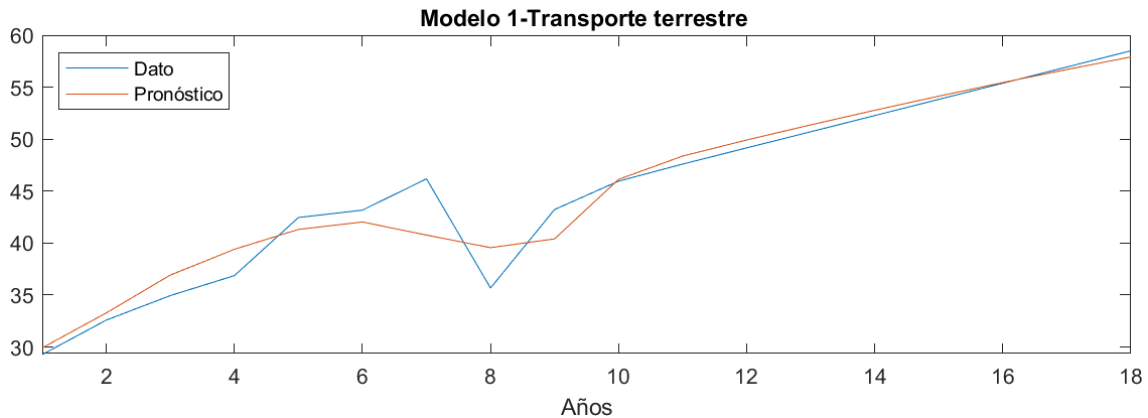


Figura 12. Modelo uno del consumo energético del transporte terrestre

### 3.2.2 Modelo dos de la energía consumida del transporte terrestre 2013-2030

$$(2 \ 1 \ 1)$$

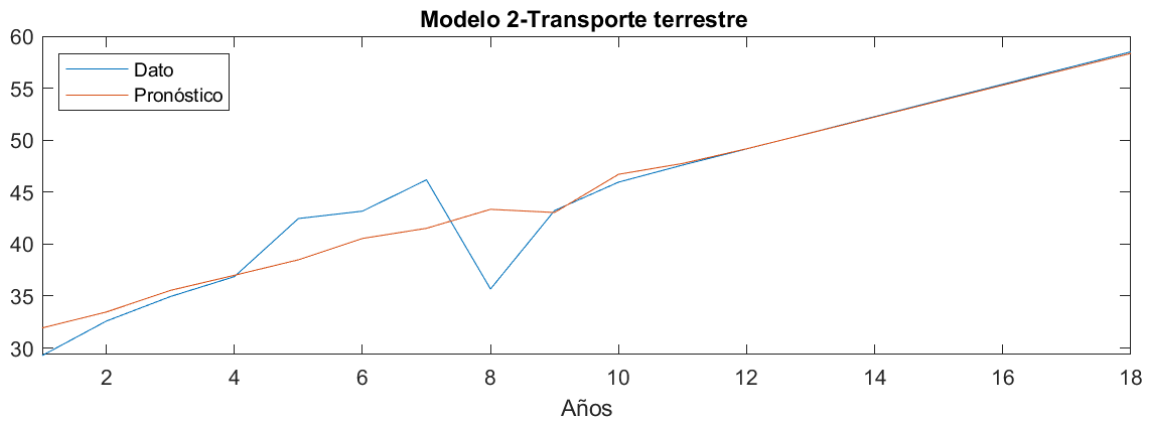
Orden autorregresivo: 2

Grado de integración: 1

Orden de media móvil: 1

$$(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2)(1 - L)y_t = c + (1 + \theta_1 L)\varepsilon_t$$

En la Figura 12. el modelo dos presenta la cantidad de kBEP del transporte terrestre consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales, a excepción de los años 4 hasta 9 que presenta un notable desajuste. Por lo tanto, demuestra un ajuste medio en sus predicciones.



**Figura 13.** Modelo dos del consumo energético del transporte terrestre

### 3.2.3 Modelo tres de la energía consumida del transporte terrestre 2013-2030

$$(1 \ 2 \ 1)$$

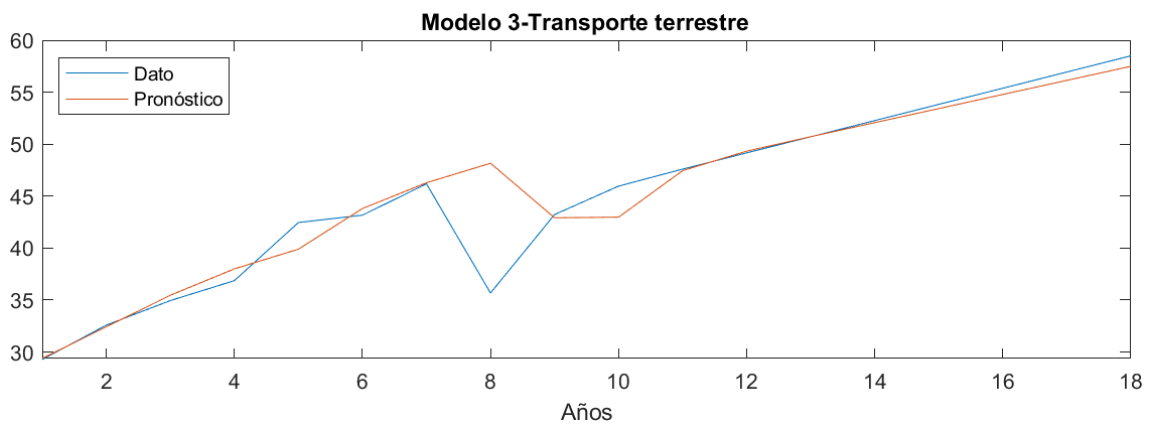
Orden autorregresivo: 1

Grado de integración: 2

Orden de media móvil: 1

$$(1 - \phi_1 L)(1 - L)^2 y_t = c + (1 + \theta_1 L)\varepsilon_t$$

En la Figura 13. el modelo tres presenta la cantidad de kBEP del transporte terrestre consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales, a excepción del año 8 que presenta un notable desajuste. Por lo tanto, demuestra un ajuste medio en sus predicciones.



**Figura 14.** Modelo tres del consumo energético del transporte terrestre

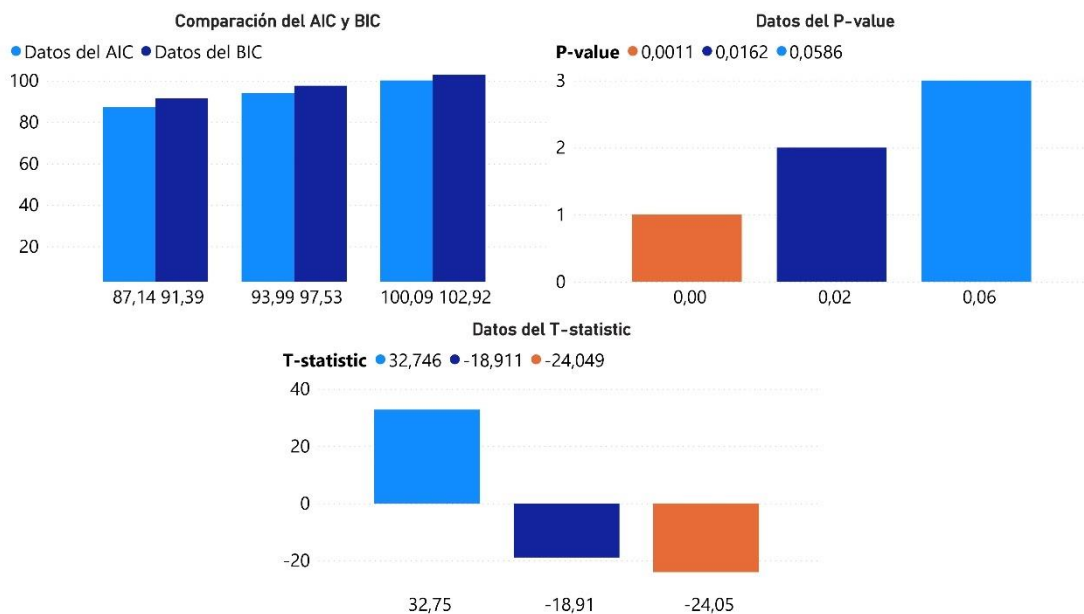
### 3.2.4 Comparación de los tres modelos del transporte terrestre 2013-2030

De acuerdo con los resultados del modelo ARIMA presentados en la Tabla 9, se comparó elementos fundamentales como el AIC, BIC, T-statistic y el P-value, el cual al analizarlos se demostró que el modelo (2 1 2) obtuvo un mejor desempeño en todos los parámetros mencionados.

**Tabla 9.** Resultados de modelos del transporte terrestre 2013-2030

| Modelo | AIC      | BIC      | T-statistic | P-value |
|--------|----------|----------|-------------|---------|
| 2 1 2  | 87.1407  | 91.3890  | 32.746      | 0.0011  |
| 2 1 1  | 93.9857  | 97.5260  | -24.049     | 0.0162  |
| 1 2 1  | 100.0906 | 102.9228 | -18.9110    | 0.0586  |

La Figura 15. presenta el gráfico de resultados derivados de los tres modelos seleccionados, destacando la comparación entre el AIC y BIC, así como el P-value y el T-statistic.



**Figura 15.** Gráfica de comparación de parámetros de los modelos del transporte terrestre

### 3.3 Datos de la energía consumida del transporte marítimo 2013-2030

En la Tabla 10. se exhibe datos anuales de la energía consumida del transporte marítimo, abarcando datos reales desde los años 2013 al 2022 y a partir de aquella información se obtuvieron datos pronosticados entre los años 2023 al 2030.

**Tabla 10.** Datos del transporte marítimo 2013-2030

| <b>Datos</b>        | <b>Año</b> | <b>Unidad (kBEP)</b> |
|---------------------|------------|----------------------|
| Datos Reales        | 2013       | 4.69                 |
|                     | 2014       | 3.88                 |
|                     | 2015       | 3.25                 |
|                     | 2016       | 2.97                 |
|                     | 2017       | 2.25                 |
|                     | 2018       | 1.92                 |
|                     | 2019       | 2.05                 |
|                     | 2020       | 1.73                 |
|                     | 2021       | 2.06                 |
|                     | 2022       | 2.30                 |
| Datos Pronosticados | 2023       | 1.21                 |
|                     | 2024       | 0.94                 |
|                     | 2025       | 0.67                 |
|                     | 2026       | 0.39                 |
|                     | 2027       | 0.12                 |
|                     | 2028       | -0.15                |
|                     | 2029       | -0.42                |
|                     | 2030       | -0.69                |

**3.3.1 Modelo uno de la energía consumida del transporte marítimo 2013-2030**

(2 1 1)

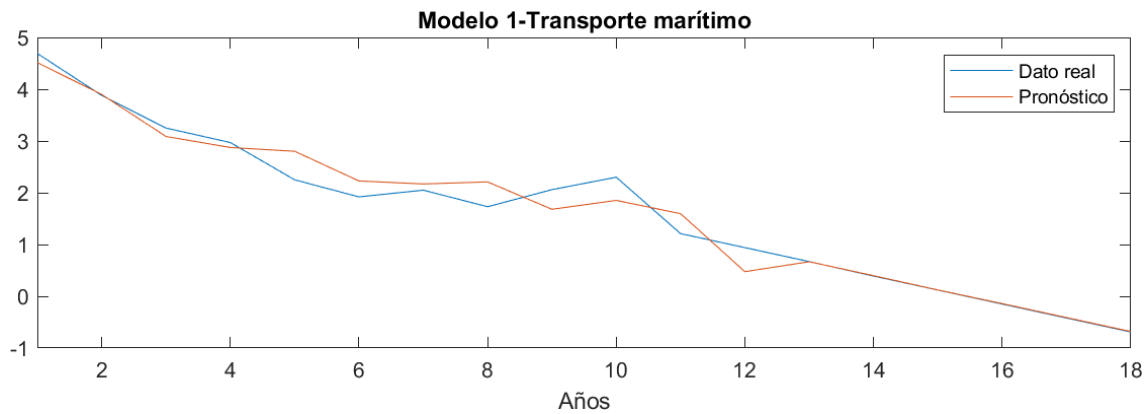
Orden autorregresivo: 2

Grado de integración: 1

Orden de media móvil: 1

$$(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2)(1 - L)y_t = c + (1 + \theta_1 L)\varepsilon_t$$

En la Figura 14. el modelo uno presenta la cantidad de kBEP del transporte marítimo consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales. Por lo tanto, demuestra un ajuste alto en sus predicciones.



**Figura 16.** Modelo uno del consumo energético del transporte marítimo

### 3.3.2. Modelo dos de la energía consumida del transporte marítimo 2013-2030

$$(1 \ 1 \ 1)$$

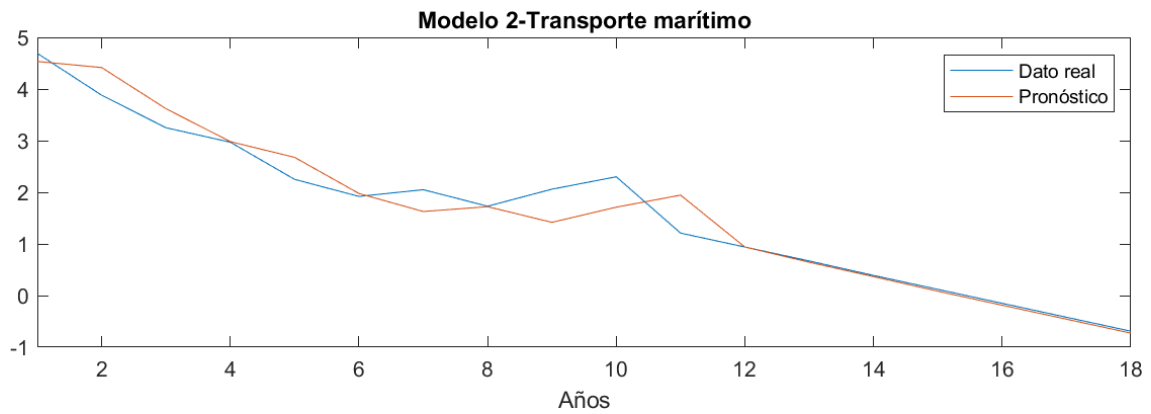
Orden autorregresivo: 1

Grado de integración: 1

Orden de media móvil: 1

$$(1 - \phi_1 L)(1 - L)y_t = c + (1 + \theta_1 L)\varepsilon_t$$

En la Figura 15. el modelo dos presenta la cantidad de kBEP del transporte marítimo consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales. Por lo tanto, demuestra un ajuste alto en sus predicciones.



**Figura 17.** Modelo dos del consumo energético del transporte marítimo

### 3.3.3 Modelo tres de la energía consumida del transporte marítimo 2013-2030

$$(3 \ 2 \ 2)$$

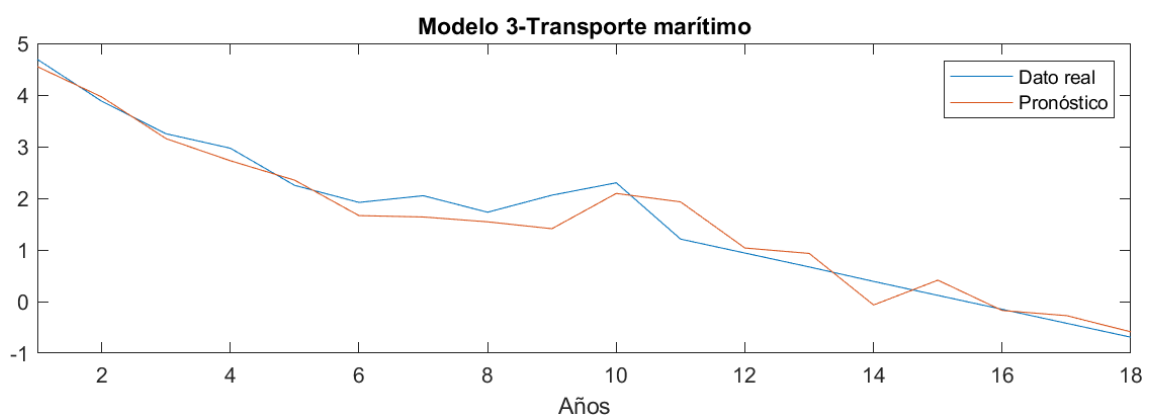
Orden autorregresivo: 3

Grado de integración: 2

Orden de media móvil: 2

$$(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \phi_3 L^3)(1 - L)^2 y_t = c + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2) \varepsilon_t$$

En la Figura 16. el modelo tres presenta la cantidad de kBEP del transporte marítimo consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales. Por lo tanto, demuestra un ajuste medio en sus predicciones.



**Figura 18.** Modelo tres del consumo energético del transporte marítimo

### 3.3.4 Comparación de los tres modelos del transporte marítimo 2013-2030

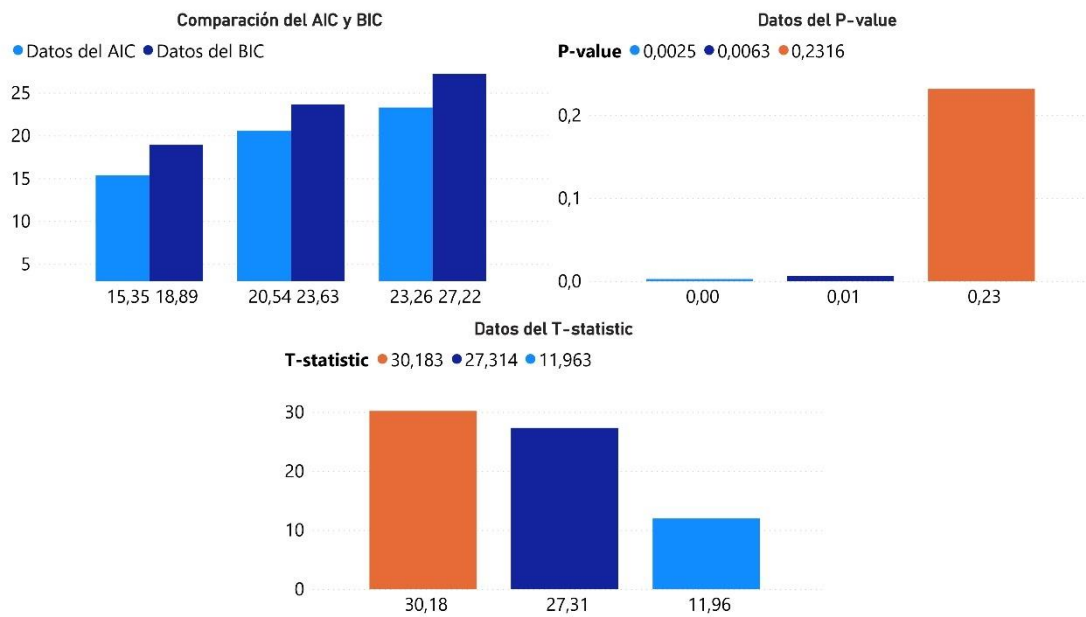
De acuerdo con los resultados del modelo ARIMA presentados en la Tabla 11, se comparó elementos fundamentales como el AIC, BIC, T-statistic y el P-value, el cual al analizarlos

se demostró que el modelo (2 1 1) obtuvo un mejor desempeño en todos los parámetros mencionados.

**Tabla 11.** Resultados de modelos del transporte marítimo 2013-2030

| Modelo | AIC     | BIC     | T-statistic | P-value |
|--------|---------|---------|-------------|---------|
| 2 1 1  | 15.3518 | 18.8921 | 30.1830     | 0.0025  |
| 1 1 1  | 20.5398 | 23.6301 | 27.314      | 0.0063  |
| 3 2 2  | 23.2616 | 27.2162 | 11.963      | 0.2316  |

La Figura 19. presenta el gráfico de resultados derivados de los tres modelos seleccionados, destacando la comparación entre el AIC y BIC, así como el P-value y el T-statistic.



**Figura 19.** Gráfica de comparación de parámetros de los modelos del transporte marítimo

### 3.4 Datos de la energía consumida del transporte aéreo 2013-2030

En la Tabla 12. se exhibe datos anuales de la energía consumida del transporte aéreo, abarcando datos reales desde los años 2013 al 2022 y a partir de aquella información se obtuvieron datos pronosticados entre los años 2023 al 2030.

**Tabla 12.** Datos del transporte aéreo 2013-2030

| <b>Datos</b>        | <b>Año</b> | <b>Unidad (kBEP)</b> |
|---------------------|------------|----------------------|
|                     | 2013       | 2.17                 |
|                     | 2014       | 2.33                 |
|                     | 2015       | 2.44                 |
|                     | 2016       | 2.55                 |
|                     | 2017       | 0.45                 |
| Datos Reales        | 2018       | 0.64                 |
|                     | 2019       | 0.7                  |
|                     | 2020       | 0.33                 |
|                     | 2021       | 0.44                 |
|                     | 2022       | 0.78                 |
|                     | 2023       | -0.11                |
|                     | 2024       | -0.36                |
|                     | 2025       | -0.61                |
| Datos Pronosticados | 2026       | -0.86                |
|                     | 2027       | -1.12                |
|                     | 2028       | -1.37                |
|                     | 2029       | -1.62                |
|                     | 2030       | -1.87                |

### ***3.4.1 Modelo uno de la energía consumida del transporte aéreo 2013-2030***

(1 1 1)

Orden autorregresivo: 1

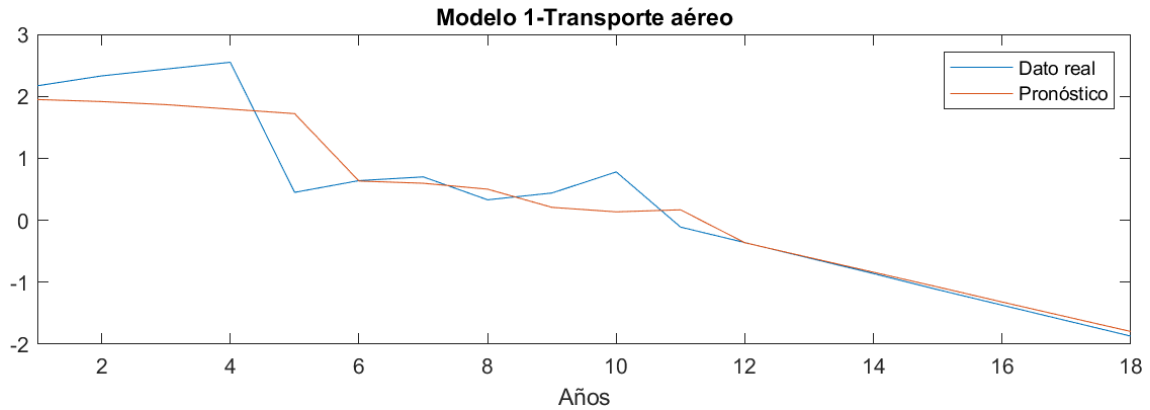
Grado de integración: 1

Orden de media móvil: 1



$$(1 - \phi_1 L)(1 - L)y_t = c + (1 + \theta_1 L)\varepsilon_t$$

En la Figura 17. el modelo uno presenta la cantidad de kBEP del transporte aéreo consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales, a excepción de los años 4 y 10 que presenta un notable desajuste. Por lo tanto, demuestra un ajuste medio en sus predicciones.



**Figura 20.** Modelo uno del consumo energético del transporte aéreo

### 3.4.2 Modelo dos de la energía consumida del transporte aéreo 2013-2030

$$(3 \ 2 \ 2)$$

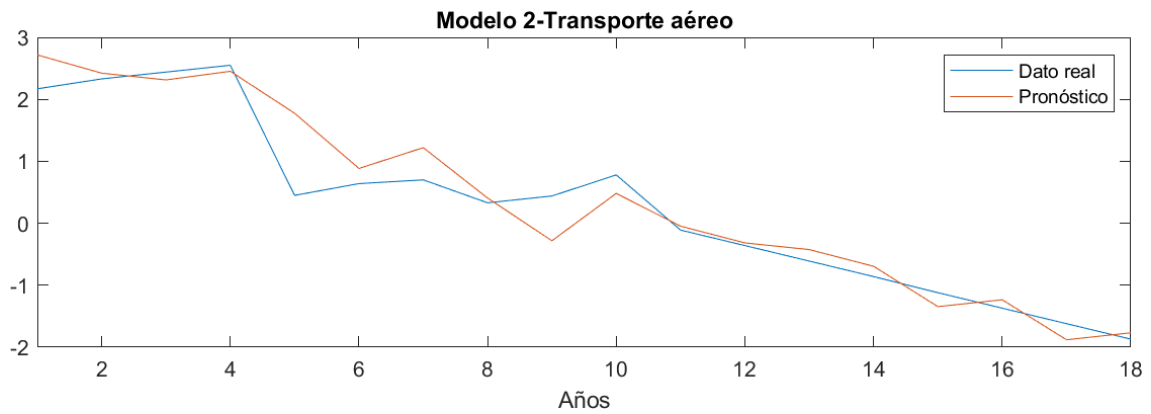
Orden autorregresivo: 3

Grado de integración: 2

Orden de media móvil: 2

$$(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \phi_3 L^3)(1 - L)^2 y_t = c + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2)\varepsilon_t$$

En la Figura 18. el modelo dos presenta la cantidad de kBEP del transporte aéreo consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales. A pesar de ello, demuestra un ajuste medio en sus predicciones.



**Figura 21.** Modelo dos del consumo energético del transporte aéreo

### 3.4.3 Modelo tres de la energía consumida del transporte aéreo 2013-2030

$$(2 \ 2 \ 2)$$

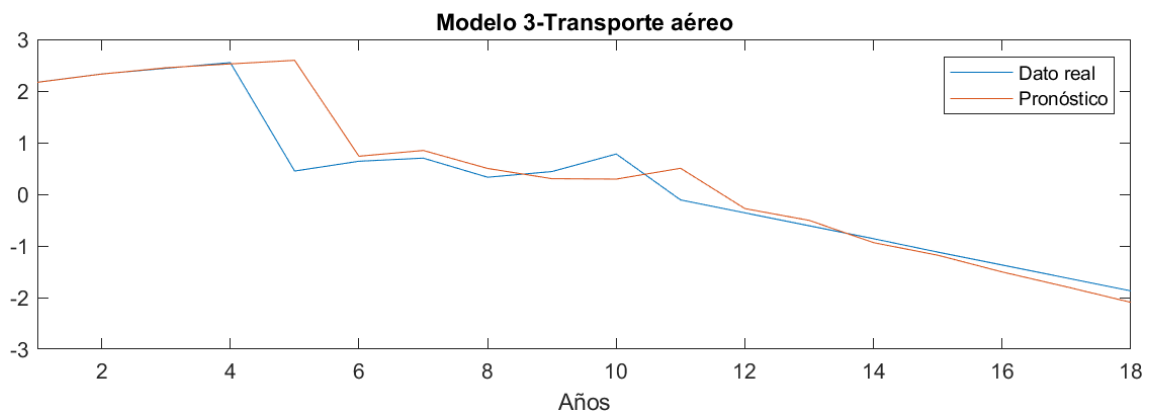
Orden autorregresivo: 2

Grado de integración: 2

Orden de media móvil: 2

$$(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2)(1 - L)^2 y_t = c + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2) \varepsilon_t$$

En la Figura 19. el modelo tres presenta la cantidad de kBEP del transporte aéreo consumidos durante un determinado período de tiempo, mostrando valores pronosticados que se acercan de manera significativa a los valores reales. A pesar de ello, demuestra un ajuste medio en sus predicciones.



**Figura 22.** Modelo tres del consumo energético del transporte aéreo

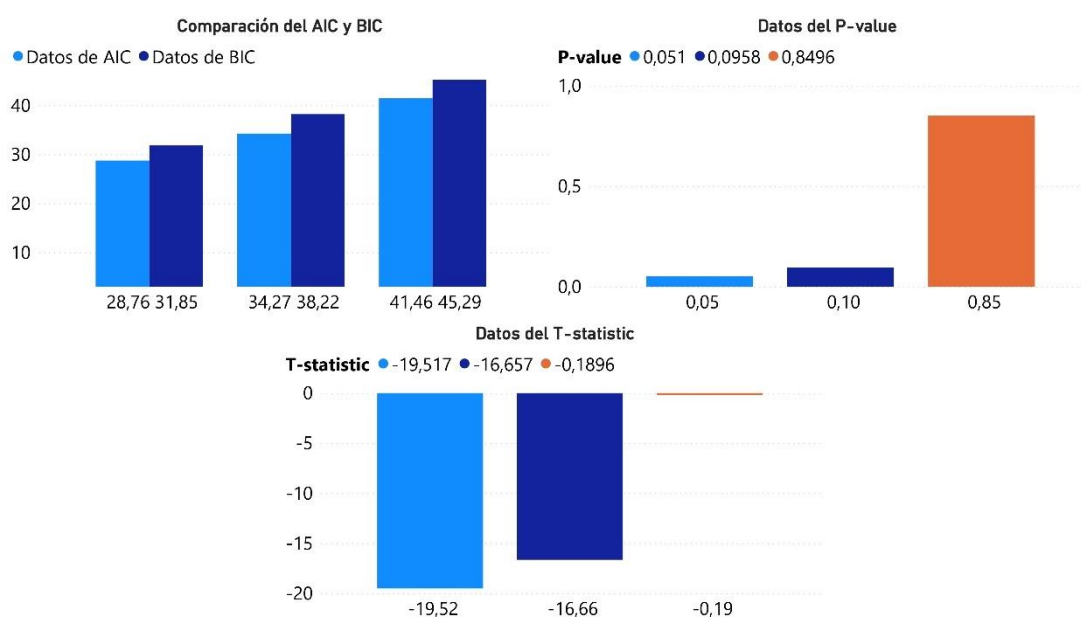
### 3.4.4 Comparación de los tres modelos del transporte aéreo 2013-2030

De acuerdo con los resultados del modelo ARIMA presentados en la Tabla 13. se comparó elementos fundamentales como el AIC, BIC, T-statistic y el P-value, el cual al analizarlos se demostró que el modelo (1 1 1) obtuvo un mejor desempeño en todos los parámetros mencionados.

**Tabla 13.** Resultados de modelos del transporte aéreo 2013-2030

| Modelo | AIC     | BIC     | T-statistic | P-value |
|--------|---------|---------|-------------|---------|
| 1 1 1  | 28.7555 | 31.8458 | -19.517     | 0.051   |
| 3 2 2  | 34.2685 | 38.2231 | -16.657     | 0.0958  |
| 2 2 2  | 41.4566 | 45.2909 | -0.1896     | 0.8496  |

La Figura 23. presenta el gráfico de resultados derivados de los tres modelos seleccionados, destacando la comparación entre el AIC y BIC, así como el P-value y el T-statistic.



**Figura 23.** Gráfica de comparación de parámetros de los modelos del transporte aéreo

### 3.5 Datos de descarbonización 2010-2030

En la Tabla 14. se exhibe datos anuales de las emisiones de GEI del sector del transporte, abarcando datos reales desde los años 2010 al 2022 y a partir de aquella información se obtuvieron datos pronosticados entre los años 2023 al 2030.

**Tabla 14.** Datos de las emisiones de GEI

| <b>Datos</b>        | <b>Año</b> | <b>ktonCO2eq</b> |
|---------------------|------------|------------------|
|                     | 2010       | 12.73            |
|                     | 2011       | 13.78            |
|                     | 2012       | 14.26            |
|                     | 2013       | 15.21            |
|                     | 2014       | 16.35            |
|                     | 2015       | 17.13            |
| Datos Reales        | 2016       | 17.88            |
|                     | 2017       | 19.01            |
|                     | 2018       | 19.27            |
|                     | 2019       | 19.57            |
|                     | 2020       | 15.93            |
|                     | 2021       | 19.26            |
|                     | 2022       | 20.64            |
|                     | 2023       | 20.94            |
|                     | 2024       | 21.50            |
|                     | 2025       | 22.06            |
| Datos Pronosticados | 2026       | 22.62            |
|                     | 2027       | 23.19            |
|                     | 2028       | 23.75            |
|                     | 2029       | 24.31            |
|                     | 2030       | 24.87            |

**3.5.1 Modelo uno de las emisiones de GEI 2010-2030**

(2 1 2)

Orden autorregresivo: 2

Grado de integración: 1

Orden de media móvil: 2

$$(1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2)(1 - L)y_t = c + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2)\varepsilon_t$$

En la Figura 20. El modelo uno proporciona la cantidad de ktonCO<sub>2</sub>eq de las emisiones de GEI en años, el cual presenta valores pronosticados que se aproximan significativamente a los valores reales, los cuales poseen una alta precisión en la proyección.

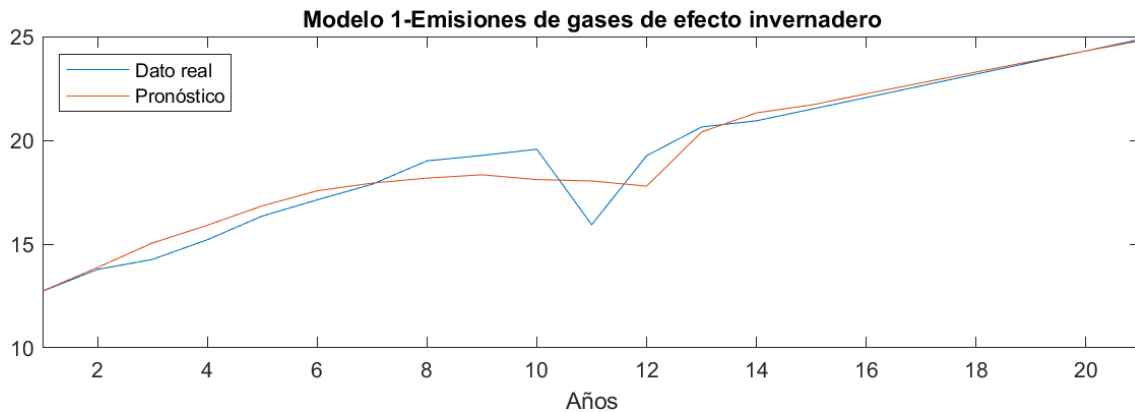


Figura 24. Modelo uno de las emisiones de gases de efecto invernadero

### 3.5.2 Modelo dos de las emisiones de GEI 2010-2030

$$(1 \ 2 \ 1)$$

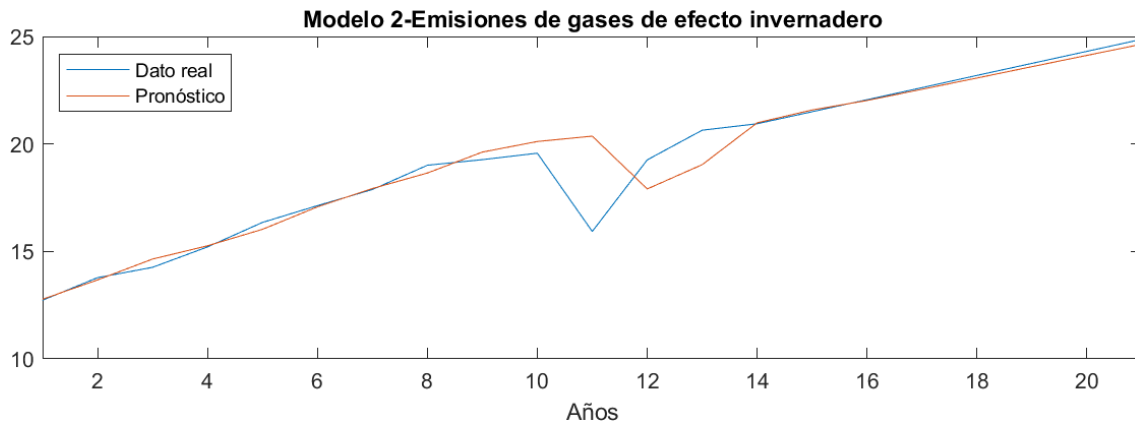
Orden autorregresivo: 1

Grado de integración: 2

Orden de media móvil: 1

$$(1 - \phi_1 L)(1 - L)^2 y_1 = c + (1 + \theta_1 L)\varepsilon_t$$

En la Figura 21. El modelo dos proporciona la cantidad de ktonCO<sub>2</sub>eq de las emisiones de GEI en años, el cual presenta valores pronosticados que se aproximan significativamente a los valores reales, los cuales poseen una alta precisión a excepción de la ligera variación que obtuvieron entre los años 10 y 14.



**Figura 25.** Modelo dos de las emisiones de gases de efecto invernadero

### 3.5.3 Modelo tres de las emisiones de GEI 2010-2030

$$(4 \ 2 \ 2)$$

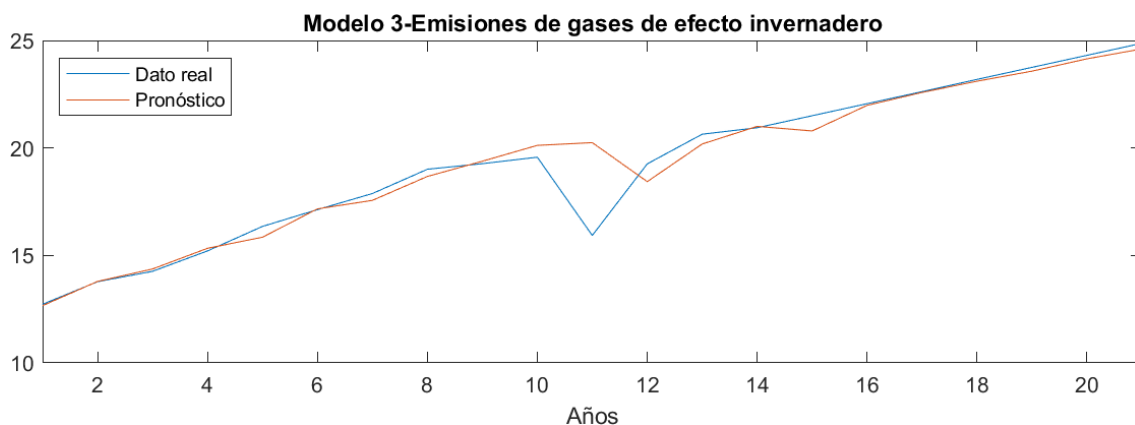
Orden autorregresivo: 4

Grado de integración: 2

Orden de media móvil: 2

$$(1 - \phi_1 L - \dots - \phi_4 L^4)(1 - L)^2 y_t = c + (1 + \theta_1 L + \theta_2 L^2) \varepsilon_t$$

En la Figura 22. El modelo tres proporciona la cantidad de ktonCO<sub>2</sub>eq de las emisiones de GEI en años, el cual presenta valores pronosticados que se aproximan significativamente a los valores reales, los cuales poseen una alta precisión a excepción de la ligera variación que obtuvieron entre los años 10 y 12.



**Figura 26.** Modelo tres de las emisiones de gases de efecto invernadero

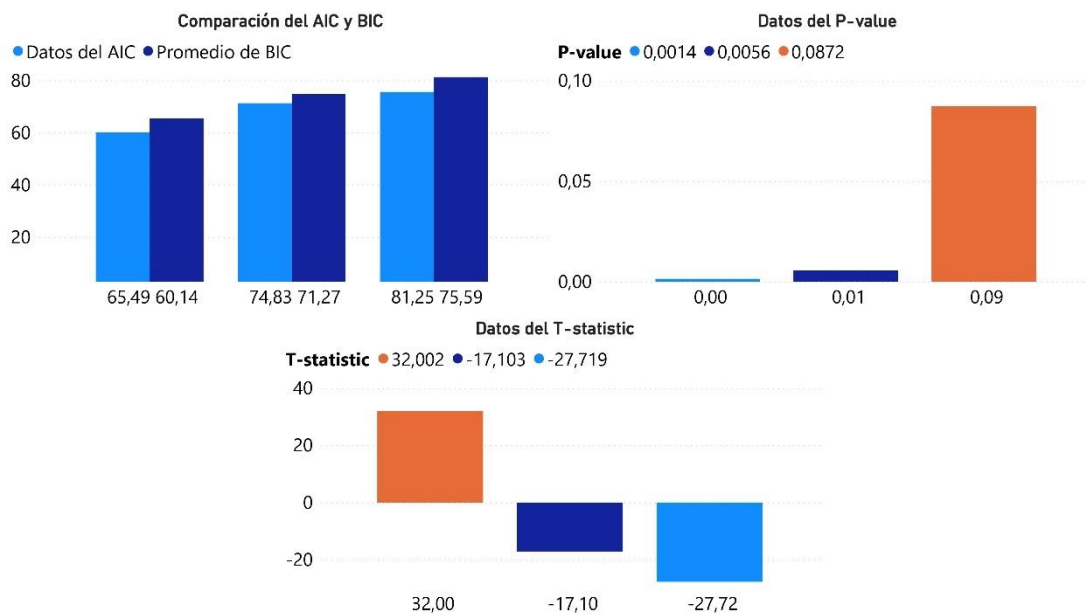
### 3.5.4 Comparación de los tres modelos de emisiones de GEI 2010-2030

De acuerdo con los resultados del modelo ARIMA presentados en la Tabla 15. se comparó elementos fundamentales como el AIC, BIC, T-statistic y el P-value, el cual al analizarlos se demostró que el modelo (2 1 2) obtuvo un mejor desempeño en todos los parámetros mencionados.

**Tabla 15.** Resultados de modelos de emisiones de GEI 2010-2030

| Modelo | AIC     | BIC     | T-statistic | P-value |
|--------|---------|---------|-------------|---------|
| 2 1 2  | 60.1432 | 65.4854 | 32.002      | 0.0014  |
| 1 2 1  | 71.2701 | 74.8316 | -27.719     | 0.0056  |
| 4 2 2  | 75.5883 | 81.2527 | -17.103     | 0.0872  |

La Figura 11. presenta el gráfico de resultados derivados de los tres modelos seleccionados, destacando la comparación entre el AIC y BIC, así como el P-value y el T-statistic.



**Figura 27.** Gráfica de comparación de parámetros de los modelos de las emisiones de GEI

## **Conclusiones**

Con el análisis de resultados descritos en el presente documento se concluye lo siguiente:

1. Los modelos que exhibieron los valores más bajos tanto en AIC como en BIC, indicaron un mejor ajuste del modelo y menor complejidad, también fueron aquellos que cumplían con los criterios de tener bajos P-values y altos T-statistics. Esta convergencia sugiere que estos modelos, al ser más concisos y ofrecer un buen ajuste a los datos, son más consistentes con la realidad y podrían ser preferidos en términos de validez y capacidad predictiva.
2. Se logró evidenciar que los modelos más simples son los que se desempeñan y ajustan de mejor manera con los datos reales y con el modelo ARIMA.
3. Se observó una notable variación en el transporte terrestre ya que este obtuvo los datos con mayor consumo de energía, según los datos históricos del BEN.

## **Recomendación**

1. Dado que el medio de transporte terrestre tiene el mayor consumo de energía y emite una cantidad significativa de gases de efecto invernadero, se sugiere reducir este impacto mediante la transición hacia vehículos eléctricos, los cuales tienen un menor consumo de energía. Además, se propone reemplazar los combustibles fósiles con fuentes de energía renovable en el futuro como una medida adicional.



## Referencias

- [1] M. Madrigal, «BID,» 5 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.iadb.org/es/historia/electromovilidad-transporte-mas-limpio-seguro-y-eficiente>. [Último acceso: 30 Noviembre 2023].
- [2] f. s, «Informe de gestion ambiental,» Pentagua, 2022.
- [3] «Ecuador - Emisiones de CO2,» Datosmacro.com, [En línea]. Available: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/ecuador>. [Último acceso: Octubre18 2023].
- [4] A. M. A. & G. J. Robalino, «Modelación de dinámica de sistemas para energías renovables y emisiones de CO 2 : un estudio de caso de Ecuador.,» Junio 2014. [En línea].
- [5] L. Gallardo y M. Osses, «¿Qué es la descarbonización?,» Center for Climate and Resilience Research , 2 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.cr2.cl/que-es-la-descarbonizacion/>.
- [6] I. d. I. G. y. Energético, «Balance Energético Nacional 2021,» Quito, 2022.
- [7] I. d. I. G. y. Energético, «Balance Energetico Nacional 2020,» Quito, 2021.
- [8] M. U. A. P. a. P. T. Vladimirovna, «Improving energy efficiency in the republic of Ecuador,» *International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM*, vol. 20, n° 5, pp. 285-292, 2020.
- [9] I. d. I. G. y. Energético, «Balance Energético Nacional 2020,» Quito, 2021.
- [10] G. Herrero, «Análisis de las fuentes Primarias y Secundarias de energía, con énfasis en el consumo de los sectores Socioeconómicos al año 2013.,» Neuquén, 2016.
- [11] G. Quenta, «Análisis comparativo del cambio en la matriz energética en Bolivia y repercusiones en el sector hidrocarburífero.,» La Paz, 2022.
- [12] A. N. Corral Naveda, «Telecommuting as a Sustainable Transportation Measure in Ecuador,» Noviembre 2021. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/356695436\\_Telecommuting\\_as\\_a\\_Sustainable\\_Transportation\\_Measure\\_in\\_Ecuador\\_Teletrabajo\\_como\\_una\\_medida\\_de\\_transporte\\_sostenible\\_en\\_Ecuador](https://www.researchgate.net/publication/356695436_Telecommuting_as_a_Sustainable_Transportation_Measure_in_Ecuador_Teletrabajo_como_una_medida_de_transporte_sostenible_en_Ecuador). [Último acceso: 2023 Noviembre 16].
- [13] G. G. Reyes Campaña, S. S. Ureña Nuñez y S. R. Miranda Jijon, «Public transportation in the DMQ by geography and incidence.,» *Espirales Revista Multidisciplinaria de Investigación*, vol. 7, n° 17, pp. 29-37, 2023.
- [14] C. F. -. I. a. Transportation, «Transportation Sector,» *ScienceDirect*, pp. 231-300, 2019.
- [15] A. García, «Transportation in a 100% renewable energy system,» *ScienceDirect*, vol. 158, pp. 266-285, 2018.

- [16] F. M. Kreuzer y G. Wilmsmeier, Energy efficiency and mobility: A roadmap towards a greener economy in Latin America and the Caribbean, CEPAL, 2015.
- [17] F. Hossain, «Transportation Sector,» *ScienceDirect*, 2019.
- [18] S. Anenberg, J. Miller, D. Henze y R. Minjares, «A global snapshot of the air pollution-related health impacts of transportation sector emissions in 2010 and 2015,» Washington, 2019.
- [19] J. A. V. W. L. G. Pedro L. Castro Verdezoto, «Analysis and projection of energy consumption in Ecuador: Energy efficiency policies in the transportation sector,» *ScienceDirect*, vol. 134, 2019.
- [20] A. Cevallos Escandón, E. A. Barragan Escandón, E. Zamalea León, X. Serrano Guerreiro y J. Terrados Cepeda, «Assessing the Feasibility of Hydrogen and Electric Buses for Urban Public Transportation using Rooftop Integrated Photovoltaic Energy in Cuenca Ecuador,» *MDPI*, vol. 16, 2023.
- [21] B. C. d. Ecuador, «Informe de la evaluación de la economía ecuatoriana en 2022 y perspectiva 2023.»
- [22] B. Mundial, «Transporte: Panorama General,» 2023.
- [23] I. E. Naranjo Chiriboga, «Modelo tarifario de transporte terrestre y los costos de distribución en la empresa productos suiza dajed cía. Ltda,» Ambato, 2018.
- [24] D. Patman, A. Splichalova, D. Rehak y V. Onderkova, «Factors Influencing the Performance of Critical Land Transport Infrastructure Elements,» *ScienceDirect*, vol. 40, pp. 1518-1524, 2019.
- [25] M. N. Postorino y A. Andreoni, «Time series models to forecast air transport demand: a study about a regional airport,» *ScienceDirect*, vol. 11, pp. 11-106, 2006.
- [26] B. Parameswaran, The liberalization of maritime transport services, Hamburg: Springer, 2014.
- [27] V. S. Espinoza, V. Guayanlema y J. Martínez Gómez, «Energy Efficiency Plan Benefits in Ecuador: Long-range Energy Alternative Planning Model,» *IJEEP*, vol. 8, n° 4, pp. 42-54, 2018.
- [28] F. Arroyo y L. J. Miguel, «Analysis of Energy Demand Scenarios in Ecuador: National Government Policy Perspectives and Global Trend to Reduce CO2 Emissions,» *IJEEP*, vol. 9, n° 2, pp. 364-374, 2019.
- [29] I. d. I. G. y. Energético, «Balance Energético Nacional 2020,» Quito, 2021.
- [30] D. Hidalgo y C. Huizenga, «Implementation of sustainable urban transport in Latin America,» *ScienceDirect*, vol. 40, n° 1, pp. 66-67, 2013.
- [31] M. Zhang y D. A. Gorovyi, «The economical advantages and disadvantages of urban passenger transport modes according to the purposes of urban passenger logistics,» *KhPI*, n° 4, pp. 40-44, 2020.

- [32] G. Dominioni, «Towards an equitable transition in the decarbonization of international maritime transport: Exemptions or carbon revenues?,» *ScienceDirect*, vol. 154, 2023.
- [33] K. Zubova, «Air transport today. advantages and disadvantages,» 2018.
- [34] D. Copara, «Análisis técnico y económico de la descarbonización a largo plazo (2010-2050) del sector residencial del Ecuador, usando datos de los impulsores de demanda de energía a una alta resolución espacial y temporal,» Ambato, 2022.
- [35] F. Blanco, «La descarbonización como oportunidad de negocio para la lucha contra el cambio climático,» 2016.
- [36] L. Gallardo y M. Osses, «Center for Climate and Resilience Research,» 2 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.cr2.cl/que-es-la-descarbonizacion/>. [Último acceso: 16 Noviembre 2023].
- [37] C. Bataille, H. Waisman, Y. Briand, J. Svensson, A. Vogt-Schilb, M. Jaramillo, R. Delgado, R. Arguello, L. Clarke, T. Wild, F. Lallana, G. Bravo, G. Nadal y G. Le Treut, «Net-zero deep decarbonization pathways in Latin America: Challenges and opportunities,» *ScienceDirect*, vol. 30, 2020.
- [38] Y. Sun, Y. Yang, S. Liu y Q. Li, «Research on Transportation Carbon Emission Peak Prediction and Judgment System in China,» *MDPI*, vol. 15, n° 20, p. 14880, 2023.
- [39] K. Meghana, V. Gauri, R. Shravani, J. Pruthviraj, K. Hrushabh, S. Nishanth, R. Conor y K. Vivek, «DECART: Planning for Decarbonising Transport Sector with Predictive Analytics - An Irish Case Study,» *SCITEPRESS*, pp. 157-164, 2022.
- [40] Cuji, C. ., & Polanco , D. (2022). Estimación Del Tiempo De Recuperación De Energía Aplicado En Producción De Hidrogeno Con Fines De Generación Eléctrica. *Revista Técnica &quot;energía&Quot;*, 18(2), PP. 74–84. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v18.n2.2022.492>
- [41] S. Glyniadakis, «Feasibility study of the insertion of electric vehicles in the Brazilian fleet: economic and environmental impacts from a Brazil 2050 perspective,» UNESP, 2021.
- [42] V. Acosta y G. Ortiz, «Análisis técnico para la producción de Hidrógeno,» Guayaquil, 2023.
- [43] Franco-Crespo, Christian y Guaman, Jessica y Chuqui, Jonathan y Tufiño, Rodrigo y Serrano-Vicenti, Sheila, Medición de los efectos del cambio climático en cultivos tradicionales del Altiplano, Ecuador. Disponible en SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4396486> o <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4396486>
- [44] C. Barreiro, «BIBDIGITAL,» 26 Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19816>. [Último acceso: 17 Noviembre 2023].

- [45] F. Plaza, «Fuentes energéticas renovables en Ecuador. Perspectivas a futuro,» *Polo del Conocimiento*, vol. 7, nº 3, pp. 1-13, 2022.
- [46] Cuji, C., & Villarreal, J. (2024). Diseño y Evaluación de un Sistema Fotovoltaico Aislado para Iluminación en Vías Rurales y Carga de Vehículos Eléctricos Basado En Un Enfoque Multipropósito. *Revista Técnica &quot;energía&Quot;*, 20(2), PP. 47–57. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v20.n2.2024.614>
- [47] Shumway, R.H., Stoffer, D.S. (2017). ARIMA Models. In: Time Series Analysis and Its Applications. Springer Texts in Statistics. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-52452-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52452-8_3)
- [48] Cuji, C., & Sisa, H. (2021). Evaluación del consumo de energía eléctrica de acuerdo a la arquitectura bioclimático mediante el Modelo ASHRAE y Gauss T-Student. *I+D Tecnológico*, 17(1), 75-86. <https://doi.org/10.33412/idt.v17.1.2926>