

# UCUENCA

## Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

### Modelo macroscópico del tráfico y estimación del tiempo de viaje en autopistas utilizando datos de sensores radar

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

#### **Autores:**

Mateo Sebastián Jácome Ulloa

David Ricardo Orellana Escandón

#### **Director:**

Diego Estuardo Correa Barahona

ORCID:  0000-0003-3551-5875

**Cuenca, Ecuador**

2024-10-29

## Resumen

La gestión del tráfico en autopistas es clave para la movilidad sostenible y reducir la congestión. Este estudio aplica modelos macroscópicos de tráfico, basados en datos de sensores de radar, en un tramo de 17 km de la autopista Cuenca-Azogues, entre Vista Linda y Puerta de Hierro. Su objetivo es mejorar la confiabilidad del tiempo de viaje y optimizar el flujo vehicular, destacando la importancia de estos modelos para la seguridad vial. Se analizaron datos de congestión y velocidad máxima, aplicando el teorema de Greenshields para modelar el flujo vehicular. La confiabilidad del tiempo de viaje se evaluó mediante el índice de tiempo de viaje (TTI), el índice de amortiguamiento (BI) y el nivel de servicio (LOS). Los resultados más significativos muestran dos picos de congestión: de 7:00-8:00 h y de 18:00-19:00 h, siendo el miércoles el día más congestionado. La dirección Sur-Norte fue más crítica de 7:00-8:00 h y la dirección Norte-Sur de 17:00-18:00 h. Las velocidades máximas fueron de 72.94 km/h en la dirección Sur-Norte y 74.80 km/h en la dirección Norte-Sur. El análisis basado en el teorema de Greenshields concluyó que no se presenta un congestionamiento significativo. El TTI ponderado fue de 1.28 para la dirección Sur-Norte y 1.25 para la dirección Norte-Sur, ambos correspondientes a un LOS de "B". Se recomienda implementar un sistema de gestión del tráfico y crear un repositorio de datos más amplio para mejorar la gestión futura.

*Palabras clave del autor:* nivel de servicio, congestión vehicular, percentiles de velocidad



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

**Repositorio Institucional:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

### Abstract

Traffic management on highways is crucial for sustainable mobility and reducing congestion. This study applies macroscopic traffic models, based on radar sensor data, over a 17 km section of the Cuenca-Azogues highway, between Vista Linda and Puerta de Hierro. Its objective is to improve travel time reliability and optimize traffic flow, highlighting the importance of these models for road safety. Congestion and maximum speed data were analyzed, applying Greenshields' theorem to model traffic flow. Travel time reliability was evaluated through the Travel Time Index (TTI), Buffer Index (BI), and Level of Service (LOS). The most significant results show two congestion peaks: from 7:00-8:00 am and from 6:00-7:00 pm, with Wednesday being the most congested day. The south-north direction was more critical from 7:00-8:00 am, and the north-south direction from 5:00-6:00 pm. Maximum speeds were 72.94 km/h in the south-north direction and 74.80 km/h in the north-south direction. The analysis based on Greenshields' theorem concluded that no significant congestion occurs. The weighted TTI was 1.28 for the south-north direction and 1.25 for the north-south direction, both corresponding to a LOS of "B." It is recommended to implement a traffic management system and create a broader data repository to improve future traffic management.

*Author Keywords:* level of service, traffic congestion, velocity percentiles



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

**Institutional Repository:** <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

## Índice de contenido

1. Introducción .....	15
1.1. Antecedentes .....	15
1.2. Planteamiento del problema .....	16
1.3. Justificación.....	16
1.4. Objetivo General.....	17
1.5. Objetivos Específicos .....	17
1.6. Alcance .....	18
2. Metodología .....	18
2.1. Lugar de estudio.....	18
2.2. Recolección de datos .....	19
2.3. Análisis de Congestionamiento Vehicular .....	20
2.4. Análisis de Velocidades.....	20
2.4.1. Estudio de Velocidad de Punto .....	20
2.4.2. Modelos Básicos del Flujo Vehicular Teorema de Greenshields .....	22
2.4.2.1. Modelo de estudio .....	23
2.5. Confiabilidad del tiempo de viaje .....	25
2.5.1. Confiabilidad .....	25
2.5.2 Factores que alteran la confiabilidad del tiempo de viaje.....	26
2.5.3. Importancia de la confiabilidad del tiempo de viaje.....	27
2.5.4. Medidas utilizadas para cuantificar la fiabilidad de tiempo de viaje .....	27
2.5.4.1. Tiempo de viaje percentil 95 .....	28
2.5.4.2. Índice de tiempo de viaje .....	28
2.5.4.3 Índice de búfer.....	28
2.5.4.4. Índice de tiempo de planificación .....	29
2.6. Nivel de servicio .....	30
3. Cálculos y Resultados.....	31
3.1. Análisis de Congestionamiento Vehicular .....	31
3.1.1. Radar Vista Linda dirección Sur Norte .....	31
3.1.2. Radar Max Uhle dirección Sur Norte .....	32
3.1.3. Radar Amaru dirección Sur Norte .....	34
3.1.4. Radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte.....	35
3.1.5. Radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte .....	37
3.1.6. Radar Puerta de Hierro dirección Sur Norte .....	38
3.1.7. Radar Puerta de Hierro dirección Norte Sur .....	40
3.1.8. Radar Puente de Nulti dirección Norte Sur.....	41

3.1.9. Radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur.....	43
3.1.10. Radar Amaru dirección Norte Sur.....	44
3.1.11. Radar Vista Linda dirección Norte Sur .....	46
3.1.12. Resultados agregados para cada dirección.....	48
3.2. Análisis de Velocidades.....	50
3.2.1. Estudio de Velocidad de Punto .....	50
3.2.1.1. Radar Vista Linda dirección Sur Norte .....	51
3.2.1.2. Radar Max Uhle dirección Sur Norte .....	53
3.2.1.3. Radar Amaru dirección Sur Norte .....	55
3.2.1.4. Radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte .....	57
3.2.1.5. Radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte.....	59
3.2.1.6. Radar Puerta de Hierro dirección Sur Norte.....	61
3.2.1.7. Radar Puerta de Hierro dirección Norte Sur .....	63
3.2.1.8. Radar Puente de Nulti dirección Norte Sur .....	65
3.2.1.9. Radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur .....	67
3.2.1.10. Radar Amaru dirección Norte Sur .....	69
3.2.1.11. Radar Vista Linda dirección Norte Sur .....	71
3.2.2. Resumen General de Velocidades .....	73
3.3. Modelos Básicos del Flujo Vehicular Teorema de Greenshields.....	74
3.3.1. Radar Vista Linda dirección Sur Norte .....	75
3.3.2. Radar Max Uhle dirección Sur Norte .....	75
3.3.3. Radar Amaru dirección Sur Norte .....	76
3.3.4. Radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte.....	76
3.3.5. Radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte .....	77
3.3.6. Radar Puerta de Hierro dirección Sur Norte .....	77
3.3.7. Radar Puerta de Hierro dirección Norte Sur .....	78
3.3.8. Radar Puente de Nulti dirección Norte Sur.....	78
3.3.9. Radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur.....	79
3.3.10. Radar Amaru dirección Norte Sur.....	79
3.3.11. Radar Vista Linda dirección Norte Sur .....	80
3.4. Confiabilidad del tiempo de viaje .....	81
3.4.1. Dirección Sur Norte .....	81
3.4.1.1. Desde Radar Vista Linda a Radar Max Uhle.....	82
3.4.1.2. Desde Radar Max Uhle a Radar Amaru.....	83
3.4.1.3. Desde Radar Amaru a Radar Lagunas de Oxidación .....	84

3.4.1.4. Desde Radar Lagunas de Oxidación a Radar Primax Challuabamba .....	85
3.4.1.5. Desde Radar Primax Challuabamba a Radar Puerta de Hierro .....	86
3.4.2. Dirección Norte Sur .....	87
3.4.2.1. Desde Radar Puerta de Hierro a Radar Puente de Nulti .....	87
3.4.2.2. Desde Radar Puente de Nulti a Radar Lagunas de Oxidación.....	88
3.4.2.3. Desde Radar Lagunas de Oxidación a Radar Amaru .....	89
3.4.2.4. Desde Radar Amaru a Radar Vista Linda .....	90
3.5. Nivel de Servicio.....	91
4. Conclusiones y Recomendaciones .....	92
4.1. Conclusiones .....	92
4.2. Recomendaciones.....	92

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Delimitación de la zona de estudio. ....	19
<b>Figura 2</b> Distribución de velocidades y el riesgo de accidentes. ....	22
<b>Figura 3</b> Diagrama fundamental de flujo vehicular. ....	24
<b>Figura 4</b> Comparación entre el promedio y el historial completo del tiempo de viaje. ....	25
<b>Figura 5</b> Beneficio de la gestión de tráfico debido a la mejora de la confiabilidad del tiempo de viaje. ....	27
<b>Figura 6</b> Medidas de confiabilidad y su relación con las medidas de congestión media. ....	29
<b>Figura 7</b> Congestionamiento vehicular radar Vista Linda dirección Sur Norte. ....	31
<b>Figura 8</b> Hora pico radar Vista Linda dirección Sur Norte. ....	32
<b>Figura 9</b> Congestionamiento vehicular radar Max Uhle dirección Sur Norte. ....	33
<b>Figura 10</b> Hora pico radar Max Uhle dirección Sur Norte. ....	33
<b>Figura 11</b> Congestionamiento vehicular radar Amaru dirección Sur Norte. ....	34
<b>Figura 12</b> Hora pico radar Amaru dirección Sur Norte. ....	35
<b>Figura 13</b> Congestionamiento vehicular radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte. ....	36
<b>Figura 14</b> Hora pico radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte. ....	36
<b>Figura 15</b> Congestionamiento vehicular radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte. ....	37
<b>Figura 16</b> Hora pico radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte. ....	38
<b>Figura 17</b> Congestionamiento vehicular radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte. ....	39
<b>Figura 18</b> Hora pico radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte. ....	39
<b>Figura 19</b> Congestionamiento vehicular radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Norte Sur. ....	40
<b>Figura 20</b> Hora pico radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Norte Sur. ....	41
<b>Figura 21</b> Congestionamiento vehicular radar Puente de Nulti dirección Norte Sur. ....	42
<b>Figura 22</b> Hora pico radar Puente de Nulti dirección Norte Sur. ....	42
<b>Figura 23</b> Congestionamiento vehicular radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur. ....	43
<b>Figura 24</b> Hora pico radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur. ....	44
<b>Figura 25</b> Congestionamiento vehicular radar Amaru dirección Norte Sur. ....	45
<b>Figura 26</b> Hora pico radar Amaru dirección Norte Sur. ....	45
<b>Figura 27</b> Congestionamiento vehicular radar Vista Linda dirección Norte Sur. ....	46
<b>Figura 28</b> Hora pico radar Vista Linda dirección Norte Sur. ....	47
<b>Figura 29</b> Congestionamiento vehicular agregado para cada dirección. ....	48
<b>Figura 30</b> Horas pico agregadas para cada dirección. ....	49
<b>Figura 31</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Vista Linda dirección Sur Norte. ....	51
<b>Figura 32</b> Distribución de velocidades medias radar Vista Linda dirección Sur Norte. ....	51
<b>Figura 33</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Vista Linda dirección Sur Norte. ....	52
<b>Figura 34</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Max Uhle dirección Sur Norte. ....	53
<b>Figura 35</b> Distribución de velocidades medias radar Max Uhle dirección Sur Norte. ....	53
<b>Figura 36</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Max Uhle dirección Sur Norte. ....	54
<b>Figura 37</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Amaru dirección Sur Norte. ....	55

<b>Figura 38</b> Distribución de velocidades medias radar Amaru dirección Sur Norte.....	55
<b>Figura 39</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Amaru dirección Sur Norte. ...	56
<b>Figura 40</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte. ....	57
<b>Figura 41</b> Distribución de velocidades medias radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte.....	57
<b>Figura 42</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte. ....	58
<b>Figura 43</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte. ....	59
<b>Figura 44</b> Distribución de velocidades medias radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte.....	59
<b>Figura 45</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte. ....	60
<b>Figura 46</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte.....	61
<b>Figura 47</b> Distribución de velocidades medias radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte. ....	61
<b>Figura 48</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte. ....	62
<b>Figura 49</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Norte Sur.....	63
<b>Figura 50</b> Distribución de velocidades medias radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Norte Sur. ....	63
<b>Figura 51</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Norte Sur. ....	64
<b>Figura 52</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Puente de Nulti dirección Norte Sur. ....	65
<b>Figura 53</b> Distribución de velocidades medias radar Puente de Nulti dirección Norte Sur. .	65
<b>Figura 54</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Puente de Nulti dirección Norte Sur.....	66
<b>Figura 55</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur. ....	67
<b>Figura 56</b> Distribución de velocidades medias radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur.....	67
<b>Figura 57</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur. ....	68
<b>Figura 58</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Amaru dirección Norte Sur.....	69
<b>Figura 59</b> Distribución de velocidades medias radar Amaru dirección Norte Sur.....	69
<b>Figura 60</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Amaru dirección Norte Sur. ...	70
<b>Figura 61</b> Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Vista Linda dirección Norte Sur. ....	71
<b>Figura 62</b> Distribución de velocidades medias radar Vista Linda dirección Norte Sur.....	71
<b>Figura 63</b> Percentiles de velocidad media acumulada radar Vista Linda dirección Norte Sur. ....	72
<b>Figura 64</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Vista Linda dirección Sur Norte.	75

<b>Figura 65</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Max Uhle dirección Sur Norte. ..	75
<b>Figura 66</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Amaru dirección Sur Norte.....	76
<b>Figura 67</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte. ....	76
<b>Figura 68</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte. ....	77
<b>Figura 69</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Puerta de Hierro dirección Sur Norte.....	77
<b>Figura 70</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Puerta de Hierro dirección Norte Sur. ....	78
<b>Figura 71</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Puente de Nulti dirección Norte Sur. ....	78
<b>Figura 72</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur. ....	79
<b>Figura 73</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Amaru dirección Norte Sur.....	79
<b>Figura 74</b> Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Vista Linda dirección Norte Sur.	80
<b>Figura 75</b> Distribución de tiempo de viaje en el primer sector de estudio sentido Sur Norte. ....	82
<b>Figura 76</b> Distribución de tiempo de viaje en el segundo sector de estudio sentido Sur Norte.....	83
<b>Figura 77</b> Distribución de tiempo de viaje en el tercer sector de estudio sentido Sur Norte.	84
<b>Figura 78</b> Distribución de tiempo de viaje en el cuarto sector de estudio sentido Sur Norte. ....	85
<b>Figura 79</b> Distribución de tiempo de viaje en el quinto sector de estudio sentido Sur Norte. ....	86
<b>Figura 80</b> Distribución de tiempo de viaje en el primer sector de estudio sentido Norte Sur. ....	87
<b>Figura 81</b> Distribución de tiempo de viaje en el segundo sector de estudio sentido Norte Sur. ....	88
<b>Figura 82</b> Distribución de tiempo de viaje en el tercer sector de estudio sentido Norte Sur.	89
<b>Figura 83</b> Distribución de tiempo de viaje en el cuarto sector de estudio sentido Norte Sur. ....	90

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Distribuciones de frecuencia de velocidad de punto.....	21
<b>Tabla 2</b>	Nivel de servicio en función del índice de tiempo de viaje.....	30
<b>Tabla 3</b>	Resumen de análisis de velocidades en todos los radares. ....	73
<b>Tabla 4</b>	Nivel de Servicio para cada tramo de la autopista en función del TTI .....	91
<b>Tabla 5</b>	Nivel de Servicio para cada dirección en función del TTI .....	91

### Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios y la Virgen Auxiliadora por darme la fuerza y la perseverancia necesarias para completar este trabajo de titulación. Sin su guía y bendiciones, nada de esto habría sido posible.

A mi madre, Mercedes, quien ha sido el pilar fundamental en mi vida, por su amor incondicional, su apoyo constante y sus palabras de aliento en los momentos más difíciles de este camino. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba de mis propias capacidades. Tu dedicación y sacrificio me han enseñado el verdadero significado de la perseverancia, el compromiso y el amor.

A mi padre, Franklin, por inculcarme desde pequeño la importancia de la educación y el trabajo duro. Tus consejos sabios y tu ejemplo de esfuerzo han sido una fuente de inspiración constante para mí.

A mi hermano, José, por su paciencia, apoyo y comprensión. Gracias por estar siempre dispuesto a escucharme, ofrecerme una perspectiva diferente y animarme a seguir adelante a pesar de todas las circunstancias adversas que se presenten. Tu amistad ha sido esencial para mantenerme enfocado y motivado durante todo este proceso.

A mis abuelos, Gerardo y Marina, por su amor y enseñanzas a lo largo de mi vida. Han sido un refugio constante en los momentos que creía que no podía más. Nada de lo que soy hoy sería posible sin ellos.

A mis tíos, Mónica y Flavio, y a mis primos Andrés, Adrián, Alex, Diego, Doménica y Boris, por ser una familia unida y siempre estar presentes en los momentos importantes de mi vida.

A mis amigos de la infancia, Andrés Ll., Sebastián S., Stalin B., Juanjo P., Josué A., Eduardo V., y Pablo S., por las risas, los momentos compartidos y su apoyo incondicional. Su amistad ha sido una fuente de motivación a lo largo de los años.

A mi hermano y compañero de tesis, David O., por su amistad, colaboración y por compartir este viaje académico conmigo. Gracias por estar siempre dispuesto a trabajar juntos y superar los desafíos que encontramos en el camino.

A mis amigos de la universidad Joaquín M., Rafaela S., Sebastián P., Mateo B., Dayana G. y Emilia Q. por su amistad y por hacer que esta etapa de mi vida sea inolvidable. También a una persona especial Anisa P. por ser mi apoyo cuando quería tirar la toalla y por acompañarme durante este proceso.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a nuestro tutor de tesis, Ing. Diego Correa, por su guía experta, sus valiosos consejos y su compromiso con nuestra formación. Su dedicación y apoyo han sido determinantes para el desarrollo de este trabajo.

## **Dedicatoria**

Esta tesis está dedicada con amor y gratitud a dos personas muy especiales en mi vida: mi madre y mi hermano.

Mamá, gracias por ser mi guía y mi mayor inspiración. Tu amor y apoyo me han acompañado en cada paso de este camino. Has sacrificado tanto para brindarme todas las oportunidades y comodidades, enseñándome las recompensas del trabajo duro. Este logro es tanto tuyo como mío. Te amo con todo mi corazón y espero que te sientas orgullosa de este logro que hemos alcanzado juntos.

Hermano, mi confidente y mejor amigo, gracias por tu compañía y apoyo. Has sido un pilar fundamental en mi vida, y tu fe en mí me ha dado la fuerza para superar los obstáculos que se han ido presentando en el camino. Compartir este logro contigo es un honor, y estoy profundamente agradecido por todo lo que has hecho por mí y poder llamarte colega.

**Mateo Sebastián Jácome Ulloa**

## Agradecimientos

En primer lugar y, ante todo, quiero dar las gracias a la Sagrada Familia y, con especial cariño, a la Virgen Dolorosa y San Antonio. Han sido un pilar fundamental y un refugio en los momentos difíciles de este camino llamado vida. Nunca me han dejado solo y siempre he sentido su amparo; sin su apoyo, nada de esto habría sido posible.

Quiero agradecer a mi familia, que nunca me ha dejado solo en los momentos complicados y siempre me ha impulsado a ser una mejor persona. En especial, a mi madre Elizabeth y mi padre Manuel, quienes son mis modelos a seguir y han visto virtudes en mí que ni yo mismo conocía. A mi madre, le agradezco por sus consejos para sobrellevar mis nervios antes de cada prueba, por alentarme cuando he tenido alguna mala nota, y por su cariño incondicional. A mi padre, le agradezco por compartir sus conocimientos para ser un mejor estudiante y por enseñarme la importancia de la perseverancia en la vida, un peldaño fundamental que se aprende día a día.

A mis hermanas, Elizabeth y Catalina, por darme impulso cada vez que lo necesito, por preocuparse por mi salud durante toda mi etapa estudiantil, y por su compañerismo y amistad que me han ayudado a seguir adelante. Su paciencia para escucharme y aconsejarme me ha hecho ser mejor cada vez.

A mis abuelos, Flavio y Magdalena, quienes siempre me hicieron sentir su cariño en cada oportunidad con sus preguntas y oraciones sobre mi desempeño en la universidad. A mis tíos Galo, Gloria y Mónica, y mis primos Sebastián, Galo, Flavio y Paola, que siempre me han ayudado a tener una visión positiva del camino universitario.

Agradezco también a los amigos que hice durante mi etapa de formación en el colegio, quienes hasta el presente me han ayudado a confiar más en mí para superar las adversidades. Por su camaradería y entusiasmo, agradezco a Mateo B., Luis G., Francisco N., Pablo N., Daniel C., Mateo C. y Paul P.

En la universidad, hubo personas muy importantes que impulsaron mi entusiasmo por el estudio en momentos difíciles. Con un balance entre risas y responsabilidad, agradezco a Sebastián P., Rafaela S., y Joaquín M. En especial, a mi compañero de tesis, Mateo J., quien ha sido como un hermano para mí. Su acompañamiento constante nos ha permitido progresar poco a poco y llegar a este momento crucial de nuestras vidas. Es una persona divertida y responsable, encontrando el balance adecuado para desarrollarnos como estudiantes.

También quiero agradecer a una persona especial, Paz C., quien ha sido mi apoyo en los momentos en que quería desistir, ayudándome a seguir adelante y a ser la persona que soy hoy. Sus cualidades inexplicables me han acompañado en este largo camino.

Por último, pero no menos importante, agradezco a los profesores que me impartieron su conocimiento, en especial al Ing. Diego Correa, mi tutor de tesis, con quien he compartido momentos amenos. Ha sido una guía invaluable para presentar este documento, compartiendo su conocimiento sobre vialidad.

## **Dedicatoria**

El presente trabajo de titulación se lo quiero dedicar, en primer lugar, a Dios. Seguido de las personas más importantes en mi vida: mi padre Manuel y mi madre Elizabeth. Sin su apoyo continuo, esto no habría sido posible. Gracias por todo su sacrificio, comprensión y motivación que me han inculcado todos los días.

También quiero dedicarlo a dos personas a quienes tengo mucho aprecio y respeto: mi abuelo Flavio y mi abuela Magdalena. Ellos me han enseñado muchos valores que aplico en mi vida, siendo mis modelos a seguir por el empeño y dedicación que ponen en cada acción.

**David Ricardo Orellana Escandón**

## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

La gestión eficiente del tráfico vehicular en autopistas se ha convertido en un desafío crucial para garantizar la movilidad sostenible y reducir la congestión urbana. La implementación de modelos macroscópicos del tráfico, respaldados por la recopilación de datos provenientes de avanzados sensores de radar, emerge como una herramienta fundamental para comprender, prever y optimizar el flujo vehicular. En este contexto, el presente estudio se centra en la aplicación de modelos macroscópicos del tráfico, los cuales abordan el comportamiento general del tráfico vehicular. La utilización de datos provenientes de sensores de radar brinda una valiosa perspectiva, permitiendo una estimación precisa del tiempo de viaje y facilitando la toma de decisiones informadas para mejorar la eficiencia del transporte en autopistas, así como la seguridad vial. (Pu, 2011) A lo largo de este trabajo de titulación, se explorarán los fundamentos teóricos de los modelos macroscópicos del tráfico, así como la importancia de la información proporcionada por los sensores de radar en la gestión y control de la movilidad.

La autopista Cuenca - Azogues es una carretera que conecta dos ciudades, que cuenta con tres carriles en cada dirección. A lo largo de la cual se encuentran técnicamente ubicados radares pedagógicos, que utilizan tecnología moderna para registrar la velocidad de los vehículos que circulan por esta importante arteria. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2020a)

A pesar de la disponibilidad de tecnología avanzada, no se ha abordado de manera adecuada en cómo implementar y optimizar estos sistemas para lograr un equilibrio entre la seguridad vial y la eficiencia del transporte. Este problema plantea desafíos importantes en la gestión del tráfico y la reducción de accidentes, lo que justifica la necesidad de investigar y desarrollar soluciones efectivas en este campo. (National Academies of Sciences Engineering and Medicine & Transportation Research Board, 2022)

La relación entre el tiempo de viaje y el Nivel de Servicio (LOS) de una carretera es esencial al establecer una conexión directa entre la confiabilidad del tiempo de viaje y los niveles de servicio para determinar las condiciones generales de la misma. (Russell, 2014)

La confiabilidad del tiempo de viaje es una de las principales medidas del rendimiento de una autopista, son utilizadas por varias instituciones públicas en Estados Unidos (Texas Transportation Institute y Cambridge Systematics, Inc, 2009) para tomar decisiones de expansión de la capacidad de la misma. (Lint et al, 2008)

El Nivel de Servicio de la autopista se clasifica en una escala de A a F según el Manual de Capacidad de Carreteras (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, &

Transportation Research Board, 2022), que se basa en la densidad de vehículos por milla por carril. Los niveles aceptables para una autopista son A-D, mientras que el nivel F se considera como un tráfico inaceptable, caracterizado por arranques y paradas continuas de los automóviles. (Russell, 2014)

## 1.2. Planteamiento del problema

La autopista Cuenca-Azogues es una vía vital que conecta importantes zonas urbanas y regionales, desempeñando un papel fundamental en la infraestructura de transporte. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2020b) Sin embargo, el aumento constante de la congestión del tráfico ha generado retrasos significativos en los tiempos de viaje, afectando la eficiencia y la confiabilidad del sistema de transporte.

La falta de una gestión eficiente ha llevado a un aumento en la congestión del tráfico, generando tiempos de viaje impredecibles y afectando la calidad de vida de los usuarios de la autopista, además de la falta de herramientas precisas para la estimación del tiempo de viaje ha contribuido a la insatisfacción de los usuarios, quienes experimentan variaciones significativas en sus desplazamientos diarios, por tanto, la pregunta de investigación a responder es: ¿Cómo pueden los modelos macroscópicos del tráfico, respaldados por la recopilación y análisis de datos provenientes de sensores de radar, mejorar la estimación del tiempo de viaje y la confiabilidad del mismo en autopistas, contribuyendo así a la optimización de la gestión del tráfico vehicular para promover la eficiencia y sostenibilidad de la autopista Cuenca-Azogues?.

## 1.3. Justificación

Esta investigación es importante debido a que aborda un problema actual, donde se analiza el comportamiento que tienen los usuarios de la autopista en un contexto de control de velocidad, relacionándolo con el nivel de servicio que ofrece la vía. (Munizaga et al., 2014) Este conocimiento es esencial para mejorar la gestión del tráfico y la seguridad vial en la autopista Cuenca – Azogues, además que la viabilidad de este estudio se basa en la disponibilidad de datos proporcionados por la EMOV, así como en la metodología de análisis, que incluye la aplicación del teorema de Greenshields. Estos recursos permiten abordar de manera efectiva el problema de investigación.

Además, se abordarán las metodologías y técnicas específicas empleadas para la estimación del tiempo de viaje, destacando la relevancia de la precisión en la recolección y análisis de datos para la toma de decisiones estratégicas. En última instancia, este estudio busca contribuir al avance en la comprensión y aplicación de modelos macroscópicos del tráfico en el ámbito de la ingeniería de transportes, con un enfoque particular en la integración efectiva

de datos provenientes de sensores de radar para optimizar la gestión del tiempo de viaje en autopistas, promoviendo así un sistema de transporte más eficiente y sostenible. (Jalali, 2023)

#### 1.4. Objetivo General

Analizar y desarrollar un enfoque integral que emplee modelos macroscópicos del tráfico, apoyados en la recopilación de datos provenientes de sensores de radar, con el propósito de mejorar significativamente la estimación del tiempo de viaje y la confiabilidad en la autopista Cuenca - Azogues. Se busca, mediante esta investigación, contribuir al perfeccionamiento de la gestión del tráfico vehicular, promoviendo la eficiencia y sostenibilidad del sistema de transporte en general.

#### 1.5. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis exhaustivo de la literatura existente sobre modelos macroscópicos del tráfico y sus aplicaciones, destacando las metodologías más relevantes en la estimación del tiempo de viaje en autopistas.
- Realizar un análisis del congestionamiento vehicular de los distintos tramos de la autopista mediante el uso de mapas de calor y gráficos de horas pico.
- Realizar un análisis de la velocidad de los vehículos recopilados durante los meses de estudio (abril 2022 a noviembre 2022) mediante el método de velocidad de punto para determinar la velocidad límite máxima.
- Realizar un análisis de las variables de tráfico aplicando el teorema de Greenshields para evaluar el comportamiento del tráfico.
- Desarrollar y validar un modelo macroscópico del tráfico que integre eficientemente los datos provenientes de sensores de radar, con el objetivo de mejorar la precisión en la estimación del tiempo de viaje.
- Analizar la confiabilidad del tiempo de viaje (Travel Time Reliability): ¿cómo medirla y por qué es importante?
- Evaluar la confiabilidad del tiempo de viaje estimado mediante la aplicación del modelo desarrollado, a través de uso del Travel Time Index (TTI).
- Evaluar el nivel de servicio (LOS) de la autopista Cuenca – Azogues. Realizar un análisis de los índices de seguridad vial en la autopista Cuenca - Azogues durante el período de estudio.
- Proponer estrategias y recomendaciones para la implementación efectiva de modelos macroscópicos del tráfico respaldados por sensores de radar, con el fin de optimizar la gestión del tráfico vehicular y promover la sostenibilidad del sistema de transporte en autopistas.

## 1.6. Alcance

- El periodo de estudio se conforma desde abril de 2022 hasta noviembre de 2022, utilizando los datos de velocidad proporcionados por la EMOV.
- Generación de figuras que evidencien el nivel de congestionamiento vehicular y las horas pico para los tramos de la autopista para analizar patrones de tráfico significativos.
- Análisis de las variables de flujo, densidad y velocidad, utilizando el teorema de Greenshields para modelar la dinámica del tráfico en el sector de estudio.
- Cálculo del TTI para cada tramo de la autopista para evaluar la confiabilidad del tiempo de viaje.
- Determinación de LOS para cada tramo y dirección de la autopista en función del TTI.

## 2. Metodología

### 2.1. Lugar de estudio

El lugar de estudio es la autopista Cuenca-Azogues. Se evaluará el tramo de la autopista que comprende desde el sector Vista Linda hasta el sector urbanización Puerta de Hierro con dirección Sur a Norte y viceversa. El tramo de vía en estudio cuenta con tres carriles en cada dirección y una longitud de 17 km aproximadamente como se indica en la Figura 1. Se cuenta con tres redondeles a lo largo del tramo de la autopista, sector subida a Turi, sector Santa Marianita del Vergel y sector Hospital José Carrasco Arteaga. Esta carretera también se la conoce como Perimetral Sur de Cuenca, misma que permite conectar la Panamericana Sur con la Panamericana Norte, de tal manera que se facilite el ingreso y salida de la ciudad de Cuenca. La misma cuenta con dos calzadas de 10.95 metros, que se encuentran distribuidos en tres carriles por calzada, cada uno cuenta con un ancho de 3.65 metros. Además, la franja divisoria central es de 4 metros de ancho delimitada por bordillos de 17 centímetros de altura libre. (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2011)

La ubicación de los radares a considerar para el análisis del nivel de servicio de la autopista son sector Vista Linda (Sur Norte y Norte Sur), sector Max Uhle (Sur Norte), sector Zoológico Amaru (Sur Norte y Norte Sur), sector Lagunas de Oxigenación (Sur Norte y Norte Sur), sector Puente Peatonal Nulti (Norte-Sur), sector Primax Challuabamba (Sur Norte) y sector urbanización Puerta de Hierro (Sur Norte y Norte Sur).

Debido a la presencia de entradas y salidas transversales a la autopista, la conservación de vehículos se considera variable puesto que los flujos de entrada y salida son significativos, sin embargo, para el posterior análisis de los datos se considerará como un flujo constante de vehículos. (Munizaga et al., 2014)

**Figura 1**

*Delimitación de la zona de estudio.*



*Nota.* Elaboración propia usando Google Earth, para mayor detalle de la ubicación de los radares, revisar Anexo A para la dirección Sur Norte y

Anexo B para la dirección Norte Sur.

## 2.2. Recolección de datos

La recolección de datos de velocidad fue proporcionada mediante bases de datos de cada radar por la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte (EMOV). Para la obtención de dichos datos se elaboró un oficio solicitando específicamente información de velocidad en la autopista Cuenca-Azogues durante el periodo de estudio (abril 2022 – diciembre 2022). El Oficio Nro. EMOV EP-GG-2023-02308-OF (

Anexo C), fue realizado el día 02 de octubre de 2023, incluyendo detalles sobre el alcance deseado para los objetivos de investigación. Este oficio se procedió a presentarlo a las autoridades correspondientes siguiendo los procedimientos establecidos por la institución.

Posteriormente, se dio un seguimiento periódico, de tal forma que se garantizó el avance del trámite y de esta manera se contó con una respuesta favorable, obteniendo la base de datos con información detallada sobre la velocidad de los vehículos por cada radar en diferentes puntos de la autopista Cuenca-Azogues. Dicha base de datos se encuentra dada en formato .db, los mismo que servirán para realiza un análisis riguroso y a profundidad en el marco de la investigación.

### 2.3. Análisis de Congestionamiento Vehicular

Las dos consecuencias principales del problema del tránsito lo constituyen la accidentalidad y el congestionamiento, aspecto a considerar en el modelo macroscópico tráfico a realizar. El congestionamiento vehicular se define como la acumulación excesiva de vehículos en una vía, en este caso la Autopista Cuenca-Azogues, que provoca la reducción significativa en la velocidad de circulación o incluso paradas totales en el tráfico. Este se produce cuando la demanda de la carretera supera su capacidad, por la presencia de intersecciones o redondeles, accidentes o averías de vehículos, obras viales o eventos especiales que aumenten la demanda del tráfico en ciertas áreas. (Chen y Varaiya, 2005)

El mismo puede causar que los conductores experimenten retrasos significativos en sus desplazamientos, aumento del consumo de combustibles debido a las paradas frecuentes del tráfico, estrés y frustración en los conductores e incluso impacto económico negativo debido a la pérdida de productividad y aumento en tiempos de transporte. (DKS Associates, 2002) Es por estas razones, que se debe analizar esta congestión con el fin de dar medidas para su mitigación, por lo que para el análisis se realizará mapas de calor y gráficos de barras verticales para presentar los índices de ocupación de la autopista por día de la semana y hora pico, respectivamente.

### 2.4. Análisis de Velocidades

#### 2.4.1. Estudio de Velocidad de Punto

Es una técnica utilizada para medir la velocidad de los vehículos en puntos específicos de una carretera o autopista. Para realizarlo se puede optar por dos métodos: el método manual (cronómetro) y el método automático (sensores de radar), que será utilizado en el estudio, puesto que estos dispositivos son capaces de detectar la velocidad de los vehículos que pasan por determinadas ubicaciones. (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018)

El proceso implica la instalación de radares en puntos estratégicos a lo largo de la carretera los cuales emiten ondas electromagnéticas que rebotan en los vehículos en movimiento, lo que permite calcular la velocidad del vehículo según el cambio en la frecuencia de las ondas reflejadas. Una vez que se recopilan los datos de velocidad, se pueden realizar análisis específicos en cada punto de medición, velocidad límite máxima. Cuyas ventajas son: identificar áreas de congestión, puntos críticos de seguridad vial o evaluar el cumplimiento de los límites de velocidad.

El primer paso en el análisis de los datos consiste en agruparlos en una tabla de frecuencias, mediante la agrupación de valores de magnitud similar en intervalos de clase, mediante la fórmula, Ancho del intervalo de clase = Amplitud total/N, donde la Amplitud total se define

como la diferencia algebraica entre la medición más grande y más pequeña, mientras N es el número de intervalos de clase. (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018) Para la obtención de la tabla de distribuciones de frecuencia, se debe realizar el cálculo de cada una de sus columnas:

**Tabla 1**

*Distribuciones de frecuencia de velocidad de punto.*

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
<b>Intervalos de clase</b>	Punto medio	Frecuencia observada	Frecuencia acumulada		(Col 2)	(Col 2) (Col 3)	(Col 3) (Col 6)
<b>Grupos de velocidad</b>		Abs	Relat.	Abs	Relat.		
<b>(km/h)</b>	$v_i$	$f_i$	$100 f_i$	$f_{ia}$	$100 f_{ia}$	$v_i^2$	$f_i v_i$
	<b>(km/h)</b>		<b>/n (%)</b>		<b>/n (%)</b>		$f_i v_i^2$

Nota. Fuente: (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018).

La Tabla 1 se compone de la siguiente manera: la columna 1 representa los intervalos de clase definidos por grupos de velocidad en incrementos de 10 km/h, elaborados de tal manera que en el primer intervalo se incluya el menor valor y en el último intervalo el mayor valor. La columna 2 es la velocidad media de cada grupo, sumando el límite inferior y superior de la clase y dividiendo entre 2. La columna 3 es el número de vehículos pertenecientes a cada grupo de velocidad. La columna 4 representa la frecuencia relativa de cada clase, es decir su frecuencia dividida para la frecuencia total de todas las clases. La columna 5 muestra la frecuencia acumulada absoluta, que es la frecuencia total de todos los valores menores que el límite real superior de clase de un intervalo de clase dado, mientras que la frecuencia acumulada relativa es la acumulada dividida entre la frecuencia total. Las columnas 6, 7 y 8 se usarán para cálculos posteriores.

Para el análisis de los parámetros más significantes que describen las características de la distribución de velocidades de punto de un flujo vehicular, se necesita de la velocidad media de punto o velocidad media temporal  $\bar{v}_t$ , que es un estimado de la velocidad esperada de cualquier vehículo que circule por cada radar, obtenida mediante la siguiente fórmula:

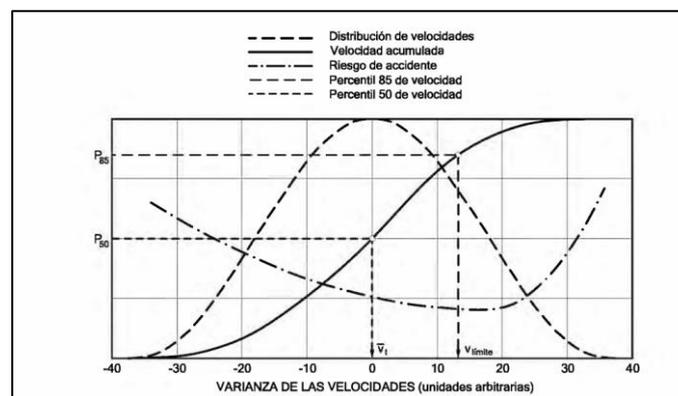
$$\bar{v}_t = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i \cdot v_i)}{n} \tag{1}$$

Donde  $\bar{v}_t$  es la velocidad media de punto, N es el número de intervalos de clase, n es el número de vehículos observados y  $f_i v_i$  es el dato calculado en la columna 7 de la tabla de distribuciones de frecuencia. Para el cálculo de la velocidad límite máxima, se necesita del

uso de los percentiles: el percentil 50 ( $P_{50}$ ) es utilizado como una medida de la calidad del flujo vehicular y es aproximadamente igual al de la velocidad media, el percentil 85 ( $P_{85}$ ) es la velocidad crítica a la cual debe establecerse el límite máximo de velocidad controlada por los sensores de radar, el percentil 15 ( $P_{15}$ ) es el límite inferior de la velocidad para control de vehículos circulando lentamente y el percentil 98 ( $P_{98}$ ) para establecer la velocidad del proyecto. La velocidad correspondiente al percentil 85 ( $P_{85}$ ), separa el comportamiento de los conductores a tener una velocidad insegura que contribuya de manera desproporcionada a riesgos de accidentes y es la que se conoce como la velocidad límite máxima como se aprecia en la Figura 2. (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018)

**Figura 2**

*Distribución de velocidades y el riesgo de accidentes.*



Nota. Fuente: (Ministry of Transportation of Canada, 2003)

### 2.4.2. Modelos Básicos del Flujo Vehicular Teorema de Greenshields

Los modelos de tráfico cuentan con tres variables principales: flujo, velocidad y densidad, las mismas deben ser analizadas a profundidad para obtener un modelo macroscópico correcto sobre el flujo vehicular de la zona o sector en el que se realice el estudio de tráfico. (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018) Para esto, se pueden relacionar estas variables mediante la ecuación fundamental del flujo vehicular, con su fórmula general:

$$q = vk \tag{2}$$

Donde  $q$  es el flujo,  $v$  es la velocidad media y  $k$  es la densidad. Para el uso de la Ecuación 2 es necesario conocer dos de sus tres variables, de esta forma, la faltante se puede calcular empleando dicha ecuación. Donde la variable más factible de obtener es el flujo, posteriormente la velocidad y por último la densidad. De esta manera se considera a la variable densidad como la dependiente.

Los modelos de flujo vehicular se clasifican en: macroscópico (operación vehicular siguiendo variables de flujo, promedios) y microscópico (espaciamientos y velocidades individuales de los vehículos), tomando en cuenta que el presente estudio se centra en el modelo macroscópico, el caso de estudio adopta como premisa un movimiento homogéneo o flujo estacionario, mismo que describe las características generales o globales del mismo.

#### 2.4.2.1. Modelo de estudio

Las investigaciones sobre el comportamiento del flujo vehicular por B.D. Greenshields según Cal y Mayor y Cárdenas (2018), relaciona la velocidad con la densidad de manera lineal mediante el ajuste por mínimos cuadrados, con lo cual se logra obtener:

$$\bar{v}_e = v_l - \left(\frac{v_l}{k_c}\right)k \quad (3)$$

Donde  $\bar{v}_e$  es la velocidad media espacial (km/h),  $k$  es la densidad (veh/km/carril),  $v_l$  es velocidad media espacial a flujo libre (km/h) y  $k_c$  es la densidad de congestiónamiento (veh/km/carril). A medida que la velocidad disminuye, la densidad aumenta, desde una velocidad a flujo libre ( $v_l$ ) hasta una velocidad mínima ( $\bar{v}_e = 0$ ), donde se alcanza su máximo congestiónamiento vehicular ( $k_c$ ).

El flujo máximo se encuentra cuando la velocidad y la densidad se encuentran en el punto medio, es decir:

$$q_m = v_m k_m = \frac{v_l k_c}{4} \quad (4)$$

Al momento de reemplazar en la ecuación fundamental se obtiene:

$$q = v_l k - \left(\frac{v_l}{k_c}\right)k^2 \quad (5)$$

De esta manera la función del flujo se presenta con una ecuación parabólica, por lo tanto, se forma una curva cóncava hacia abajo. Cuando la densidad es cercana a cero, el flujo también es cercano a cero, de esta forma se presenta un flujo libre. De igual forma, cuando la densidad es máxima ( $k = k_c$ ) los vehículos se detienen uno tras otro. (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018)

Además, la velocidad se obtiene del despeje de la ecuación fundamental, donde se obtiene:

$$v = \frac{q}{k} \quad (6)$$

Al momento de relacionar la velocidad y el flujo, mediante el despeje de fórmula se obtiene:

$$\bar{v}_e = \frac{v_l}{2} \pm \frac{\sqrt{v_l^2 - 4 \left(\frac{v_l}{k_c}\right) q}}{2} \tag{7}$$

Lo cual indica una relación parabólica entre la velocidad y el flujo, misma que forma una parábola cóncava hacia la izquierda.

La densidad se representa en el diagrama de velocidad – flujo, obteniendo:

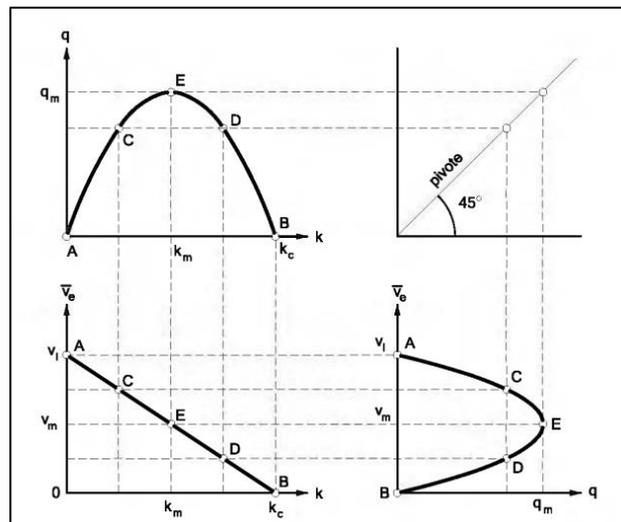
$$k = \frac{q}{v} = \frac{1}{\frac{v}{q}} \tag{8}$$

La relación que existe entre el flujo y la densidad es la base del control de tránsito para carreteras, debido que la densidad se puede expresar en porcentaje de ocupación de ciertos tramos. Además, se debe tener en cuenta que la interacción entre velocidad y flujo se utiliza principalmente para identificar los niveles de servicio y de productividad (May, 1990).

En la Figura 3 se presenta el gráfico que relaciona flujo, velocidad y densidad. Mismo que muestra que la proyección de los picos de la gráfica de densidad vs flujo y flujo vs velocidad coinciden con el punto medio de la gráfica densidad vs velocidad. Además, se cuenta con un pivote de 45° el cual sirve para proyectar los puntos de mayor conveniencia de estudio, en este caso se trata del punto E.

**Figura 3**

*Diagrama fundamental de flujo vehicular.*



*Nota.* Fuente: (Cal y Mayor y Cárdenas, 2018)

## 2.5. Confiabilidad del tiempo de viaje

### 2.5.1. Confiabilidad

La confiabilidad se define como el grado de certeza, medida de consistencia, puntualidad, previsibilidad y confiabilidad que existe en los tiempos de viaje para un sistema de transporte en el cual se traslade una persona de un lugar A hacia un lugar B. En este caso se puede decir que los sistemas de transporte confiable ofrecen un nivel de seguridad con el objetivo de alcanzar un destino determinado dentro de un plazo de tiempo razonable esperado. Por el contrario, un sistema de transporte poco confiable es aquel que cuenta con retrasos inesperados, lo cual aumenta el costo para los usuarios. (Navarro y Herrera, 2013)

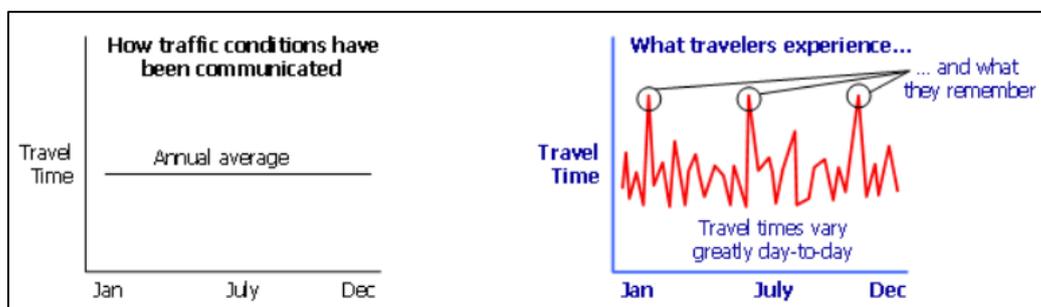
En una carretera o segmento de carretera existe un diferente flujo vehicular con el transcurso de las horas del día, para lo cual la confiabilidad de tiempo de viaje sirve como medida de la confiabilidad en el tiempo de viaje. Mismo que se mide en tiempo adicional que necesita un conductor para compensar los retrasos en su desplazamiento. Esta medida es importante, debido que los usuarios podrían tomar mejores decisiones con respecto al uso de su tiempo.

El tiempo de viaje que le toma a los usuarios desplazarse de un lugar a otro, se traduce en los promedios históricos, mismos que son calculados durante periodos de un año. Así mismo es probable que este tiempo varíe de acuerdo con las condiciones de la carretera o tráfico. (U.S. Department of Transportation, 2019)

En la Figura 4 se indica el cambio que existe entre el promedio de tiempo de viaje anual en la gráfica de la izquierda y todo el historial de los tiempos que emplearon los usuarios para realizar el mismo viaje (gráfica de la derecha), en este caso se observa que existen picos, que es lo que los usuarios recuerdan, haciendo que en ciertos días hayan experimentado un retraso inesperado.

#### Figura 4

*Comparación entre el promedio y el historial completo del tiempo de viaje.*



Nota. Fuente: (U.S. Department of Transportation, 2019)

### 2.5.2 Factores que alteran la confiabilidad del tiempo de viaje

Según U.S. Department of Transportation (2019) entre los factores que pueden alterar la confiabilidad de viaje se encuentra:

- Los cuellos de botella: Hace referencia a cuando una carretera cuenta con una capacidad de tráfico reducida a comparación a la capacidad que tiene un segmento de vía hacia atrás. Esto puede ocurrir por diversas circunstancias, entre las cuales se encuentra las caídas de rocas, presencia de secciones de fusión, cambios en las características de la carretera, intercambios de autopista a carretera, etc.
- Los accidentes de tráfico: Este factor considera eventos aleatorios que interrumpen en el flujo regular del tráfico, con lo cual se causa una reducción de la capacidad de la carretera. Se puede incluir a los daños en vehículos, colisión entre vehículos, cargas derramadas y escombros. Adicionalmente, los conductores al ver un choque generalmente disminuyen la velocidad para observarlo, lo que demora aún más el tiempo de viaje.
- Los dispositivos de control de tráfico: Estos dispositivos son utilizados para guiar, informar y controlar el flujo vehicular o peatonal. La mala utilización, colocación o programación de estos dispositivos puede generar retrasos en el tiempo de viaje poco confiable.
- El clima: Las condiciones climáticas adversas entre las cuales se incluye resplandor del sol, lluvia, nieve, etc. interfieren con la visibilidad de los conductores, dando como resultado una reducción de la capacidad y por ende retrasos.
- La fluctuación de la demanda de viajes: Las variaciones en la ocupación de carretera son diarias, pero se ven afectadas principalmente por días festivos, llegada de turistas o transporte escolar, para lo cual se debe desviar el tráfico por rutas alternas o promover el uso de transporte público, de tal manera que se disminuya la congestión.
- Las zonas de trabajo: Son espacios temporales ocupados por actividades de construcción en la carretera, lo cual incluye cierre de carriles, reducción del ancho del carril, etc. En este caso las zonas ocupadas para trabajo a largo plazo no tienen tanta incidencia como las zonas a corto plazo, debido a que los conductores se familiarizan más con la carretera y su estado.
- Los eventos especiales: Suele provocar cambios repentinos en la demanda de viajes, lo cual provoca tendencias irregulares dando como resultado retrasos inesperados. Generalmente ocurre en lugares de congestión pública, es decir, estadios, teatros, cines, etc.

### 2.5.3. Importancia de la confiabilidad del tiempo de viaje

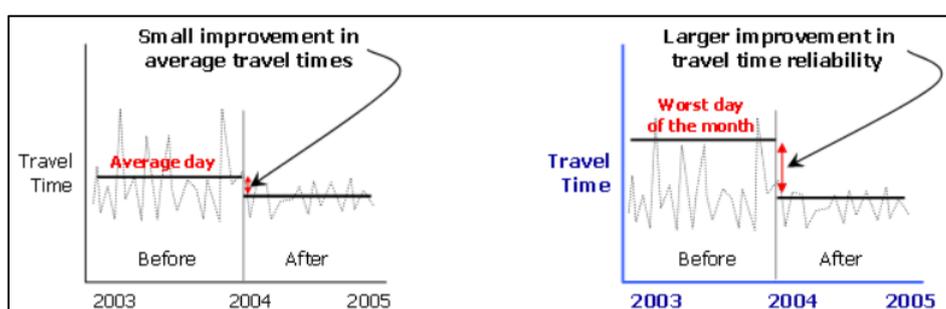
Los usuarios del transporte tienen gran importancia sobre la confiabilidad del tiempo de viaje, sobre todo los viajeros personales y de negocios, debido que pueden realizar un mejor uso de su tiempo. Los transportistas de mercancía necesitan una cierta confiabilidad para que su servicio sea valioso. De esta manera se puede cuantificar los beneficios en la gestión de tráfico. (Yang, 2015b) Los operadores de tráfico usan estos datos para monitorear el mismo e implementar estrategias que mitiguen la congestión (Choe et al., 2002) y también para calibrar modelos de simulación de tráfico para cuantificar los potenciales beneficios de tecnologías emergentes. (Coifman y Cassidy, 2002)

El estudio realizado por Mehran y Nakamura (2009) midió el impacto de ciertas condiciones en la confiabilidad del tiempo de viaje, como el clima y los accidentes en un tramo de autopista. Los resultados mostraron que establecer medidas de alivio del impacto puede mejorar significativamente la confiabilidad del tiempo de viaje, y acciones como permitir el uso de la zona pavimentada al lado de la calzada principal, como un carril adicional, ofrecieron más capacidad y redujeron la ocurrencia de accidentes.

En la Figura 5 se observa que en la gráfica de la izquierda se puede percibir que la mejora de tiempo es poco significativa, sin embargo, en la gráfica de la derecha se observa que la mejora por la confiabilidad de viaje es mayor, debido que se muestra el efecto mejorado para los peores días en un retraso inesperado.

#### Figura 5

*Beneficio de la gestión de tráfico debido a la mejora de la confiabilidad del tiempo de viaje.*



*Nota.* Fuente: (U.S. Department of Transportation, 2019)

### 2.5.4. Medidas utilizadas para cuantificar la fiabilidad de tiempo de viaje

Según U.S. Department of Transportation (2019) los parámetros necesarios para evaluar la confiabilidad del tiempo de viaje son:

### 2.5.4.1. Tiempo de viaje percentil 95

Es la medida más simple de la confiabilidad del tiempo de viaje en rutas o viajes específicos, indicando la gravedad del retraso en el día de viaje más transitado. Para que exista una mejor comprensión por parte de los usuarios los tiempos de viaje del percentil 95 se debe presentar en minutos y segundos, de esta forma los usuarios están familiarizados con el tiempo que les toma realizar el viaje. La gran desventaja es que no se puede comparar tiempos entre viajes, debido que la duración para cada viaje es distinta.

### 2.5.4.2. Índice de tiempo de viaje

También conocida con sus siglas en inglés TTI (Travel Time Index) es utilizado para medir el tiempo de viaje en el periodo pico superior al experimentado en condiciones de flujo libre.

Este índice se calcula con la relación que existe entre el tiempo de viaje empleado en el periodo pico y el tiempo de viaje en flujo libre o también conocido como FFTT (Free-Flow Travel Time), para lo cual se debe seguir la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de tiempo de viaje} = \frac{\text{Periodo pico del tiempo de viaje}}{\text{Flujo libre del tiempo de viaje}} \quad (9)$$

### 2.5.4.3 Índice de búfer

También conocido como Buffer Index (BI) o tiempo de amortiguamiento, representa el tiempo que los usuarios añaden a su tiempo de viaje medio para el momento de planificar su traslado, de tal manera que se garantice una llegada a tiempo.

Se sabe que este tiempo adicional se lo añade para tener en cuenta algún retraso inesperado, mismo valor que se expresa en porcentaje, donde a medida que empeora su confiabilidad en tiempo de viaje, su valor aumentará. Para lo cual se sigue la ecuación:

$$\text{Índice de búfer (\%)} = \frac{\text{Tiempo de viaje del percentil 95} - \text{Tiempo promedio de viaje}}{\text{Tiempo promedio de viaje}} \quad (10)$$

$$\text{Índice de búfer (minutos)} = \text{Índice búfer} * \text{Tiempo promedio de viaje} \quad (11)$$

En la fórmula presentada se toma en cuenta el tiempo de viaje del percentil 95, esto debido que tiene en cuenta el tiempo de viaje en casi el peor de los casos. De esta forma se garantiza que el usuario llegue a tiempo a su lugar de destino el 95% de los viajes.

### 2.5.4.4. Índice de tiempo de planificación

Más conocido por sus siglas en inglés, PTI (Planning Time Index) es el tiempo total de viaje que se planifica al momento de disponer un tiempo de amortiguamiento adecuado incluido. A diferencia del índice búfer, se toma en cuenta el retraso típico y el retraso inesperado, de esta manera se compara el tiempo de viaje casi en el peor de los casos con el tiempo empleado para el mismo viaje en flujo ligero.

El tiempo de planificación abarca el tiempo total de viaje que se necesita para llegar puntual el 95% de viajes, Para lo cual se emplea el percentil 95 y se sigue la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de tiempo de planificación} = \frac{\text{Tiempo de viaje del percentil 95}}{\text{Tiempo de viaje en flujo libre}} \quad (12)$$

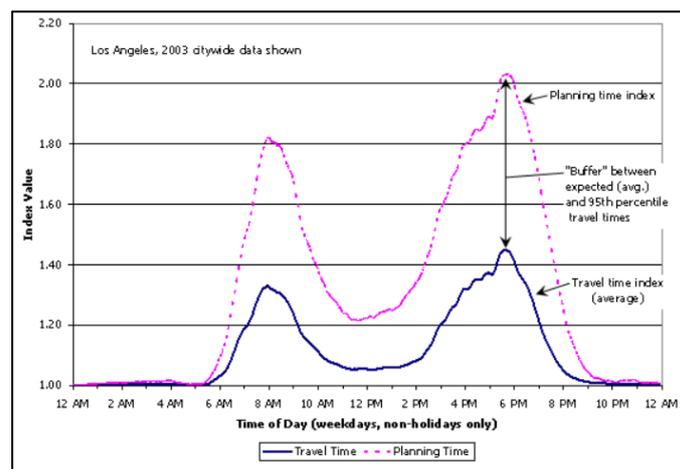
Donde se debe tener en cuenta que los resultados de este índice siempre deben ser mayores o iguales a 1. Para encontrar el tiempo en minutos se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Índice de tiempo de planificación (minutos)} \\ = \text{Índice de tiempo de planificación} * \text{Tiempo de viaje en flujo libre} \end{aligned} \quad (13)$$

En la Figura 6, se muestra la relación que existe entre el índice de tiempo de viaje (tiempo adicional promedio requerido en horas pico a diferencia de tráfico ligero), índice de zona de influencia (tiempo adicional por encima del tiempo pico de viaje) y el índice de tiempo de planificación (tiempo de viaje total necesario).

**Figura 6**

*Medidas de confiabilidad y su relación con las medidas de congestión media.*



Nota. Fuente: (U.S. Department of Transportation, 2019)

## 2.6. Nivel de servicio

Más conocido por sus siglas en inglés LOS (Level of Service), se trata de una medida que caracteriza las condiciones de operación del tránsito en la carretera. Según National Academies of Sciences Engineering and Medicine, & Transportation Research Board (2022) existen 6 niveles de servicio (A, B, C, D, E y F), donde el nivel A representa un flujo libre y sin demoras, mientras que el nivel F es el peor nivel de servicio de la carretera, donde existe gran densidad de vehículos y aumentan las demoras lo cual tiene relación directa con la velocidad de operación en los usuarios.

Existen diversas formas de conseguir el nivel de servicio, entre las cuales se encuentra el TPDA (Tránsito Promedio Diario Anual), donde se debe tener en cuenta varios factores de corrección y el conteo de tráfico pesado. (Lin y Su, 1998) Por otro lado, también se puede clasificar mediante los índices de confiabilidad del tiempo de viaje, como se muestra en la Tabla 2:

**Tabla 2**

*Nivel de servicio en función del índice de tiempo de viaje.*

LOS	Travel Speed and Equivalent TTIs
A	$\geq 60$ (TTI $\leq 1.083$ )
B	50 - 59 ( $1.083 < \text{TTI} \leq 1.300$ )
C	45 - 49 ( $1.300 < \text{TTI} \leq 1.444$ )
D	40 - 44 ( $1.444 < \text{TTI} \leq 1.625$ )
E	35 - 39 ( $1.625 < \text{TTI} \leq 1.857$ )
F	$< 35$ (TTI $> 1.857$ )
	Mean TTI

Nota. Fuente: (Russell, 2014)

## 3. Cálculos y Resultados

### 3.1. Análisis de Congestionamiento Vehicular

En esta sección, se presentan los gráficos realizados a partir de los datos de cantidad de vehículos recopilados en los puntos específicos de la carretera utilizando sensores de radar, según se describió en la sección anterior de metodología. El análisis se centra en identificar patrones de congestionamiento vehicular diario y horas pico mediante mapas de calor y gráficos de barras verticales.

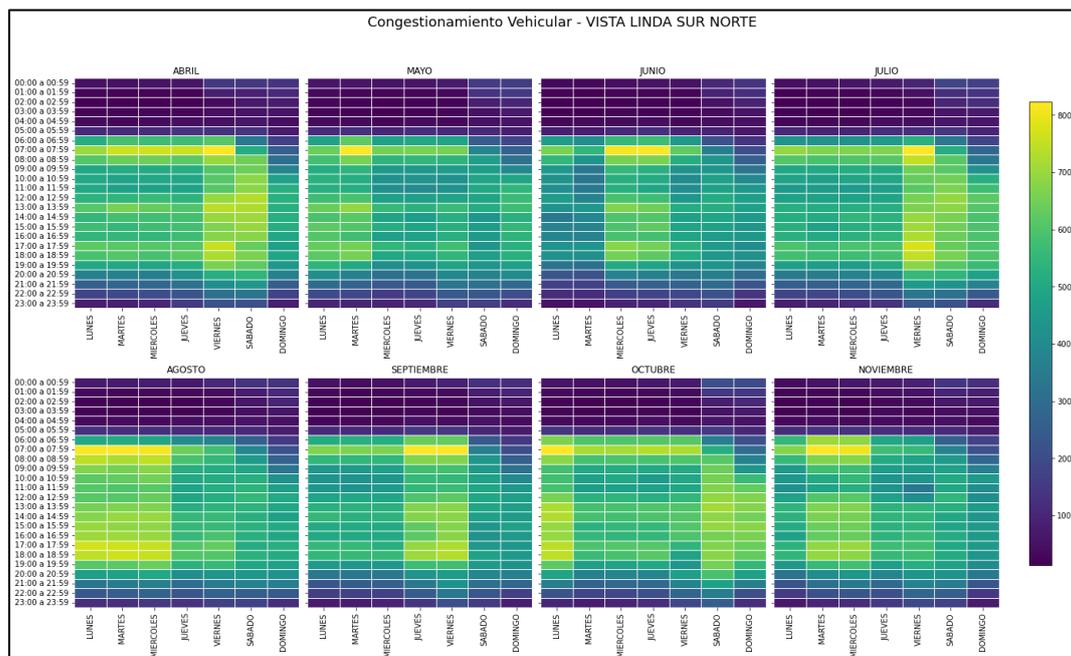
#### 3.1.1. Radar Vista Linda dirección Sur Norte

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.921021, Longitud: -79.020554

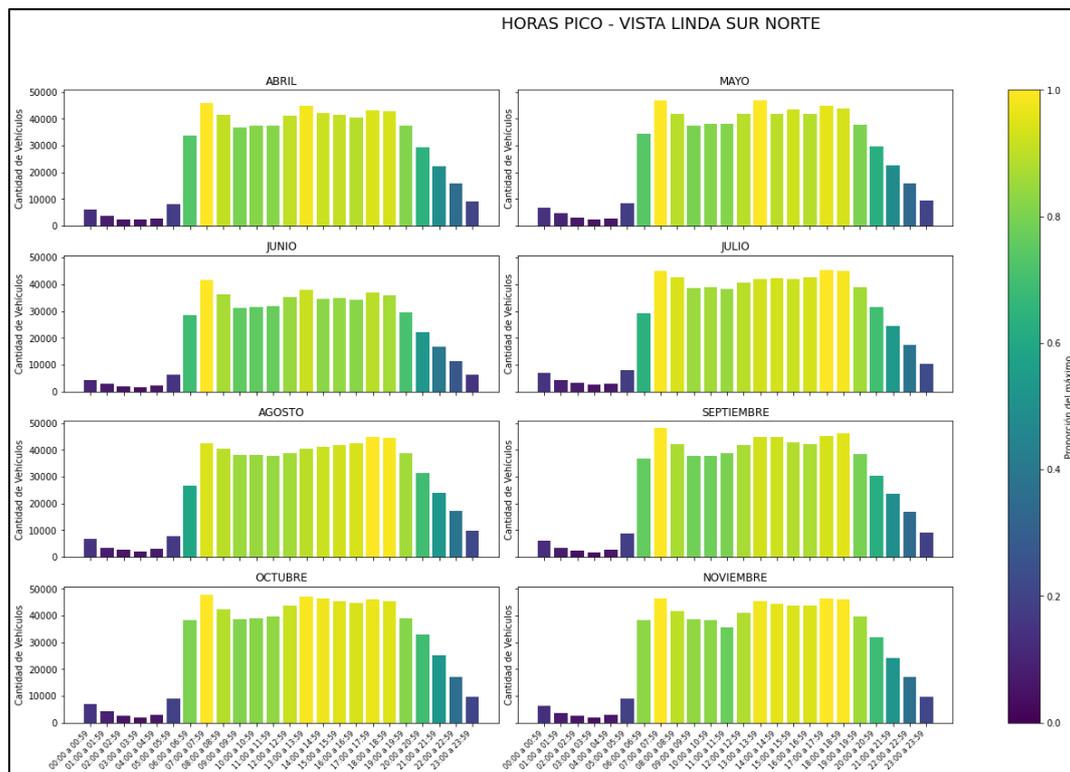
**Figura 7**

*Congestionamiento vehicular radar Vista Linda dirección Sur Norte.*



**Figura 8**

*Hora pico radar Vista Linda dirección Sur Norte.*



La Figura 7 de congestión vehicular muestra el mes de agosto como el más transitado, alcanzando su pico en el horario de 7:00 h a 8:00 h con alrededor de 8000 vehículos en la vía, infiriendo que es, la hora en la que las personas se trasladan a su lugar de trabajo o estudio, dando como resultado mayor concentración del tráfico en esta zona. De igual manera ocurre con los meses restantes, con una tendencia a las 7:00 h como hora de mayor congestión vehicular.

La Figura 8 correspondiente a las horas pico muestra tres intervalos con mayor afluencia de vehículos: de 7:00 h a 8:00 h, de 13:00 h a 14:00 h, y de 17:00 h a 19:00 h. Esto se debe a la tendencia de la población de Cuenca de trasladarse durante estos horarios para cumplir con sus actividades laborales, incluyendo la entrada, almuerzo y salida del trabajo. Estos patrones resultan en picos de tráfico en la vía.

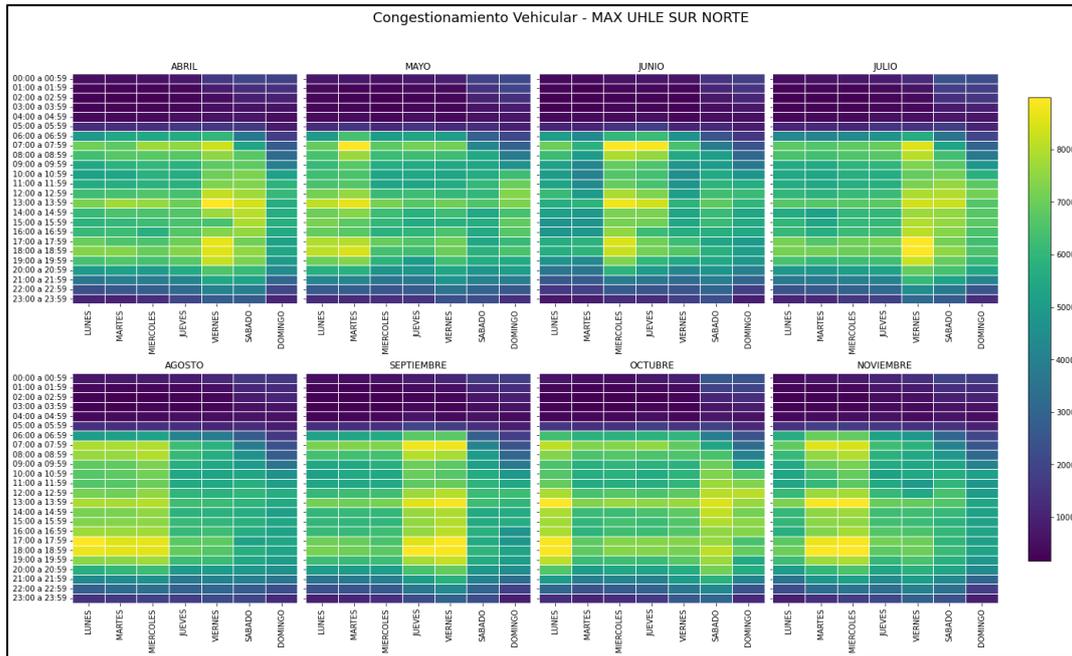
### 3.1.2. Radar Max Uhle dirección Sur Norte

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.909788, Longitud: -78.981800

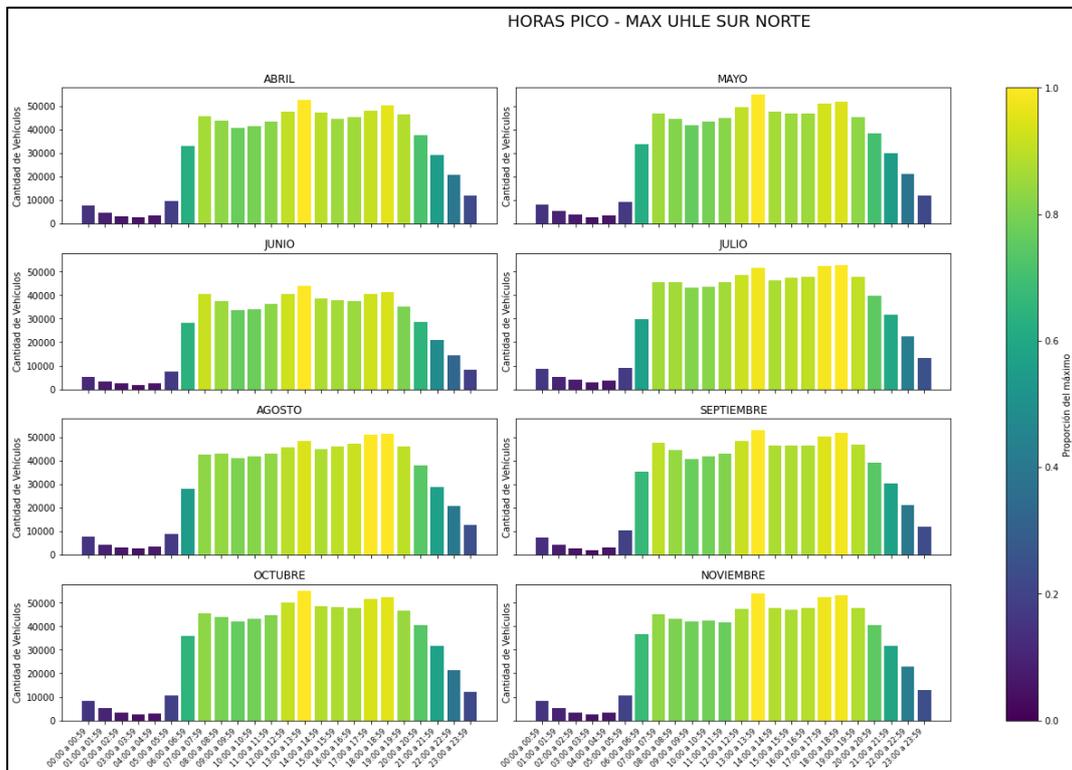
**Figura 9**

*Congestionamiento vehicular radar Max Uhle dirección Sur Norte.*



**Figura 10**

*Hora pico radar Max Uhle dirección Sur Norte.*



En la Figura 9 se evidencia que los lunes, martes y miércoles del mes de agosto presentan un flujo vehicular relativamente constante, con picos de tráfico entre las 17:00 h y las 19:00 h. Esta observación sugiere que este intervalo horario corresponde a la salida laboral y, además, al periodo vacacional de la población de Cuenca, lo que incrementa el volumen de vehículos en circulación.

Los datos proporcionados por este radar muestran una notable dispersión en relación con los días de la semana con mayor afluencia vehicular, lo que podría atribuirse a las fluctuaciones en el ingreso y salida de vehículos en la vía. No obstante, el análisis de la Figura 10, referente a horas pico, revela una tendencia al aumento del tráfico en las mañanas, tardes y noches. El mayor incremento se registra entre las 13:00 h y las 14:00 h, con un aproximado de 50000 vehículos en la vía, indicando una significativa concentración vehicular en ese intervalo de tiempo.

### 3.1.3. Radar Amaru dirección Sur Norte

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.891159, Longitud: -78.956398

**Figura 11**

*Gestionamiento vehicular radar Amaru dirección Sur Norte.*

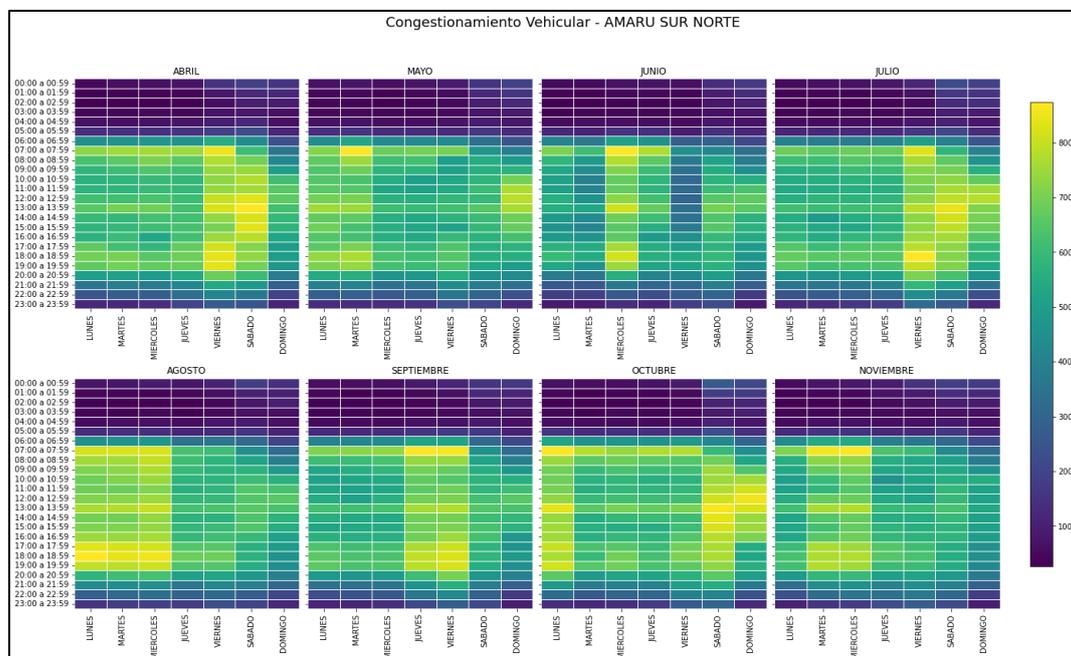
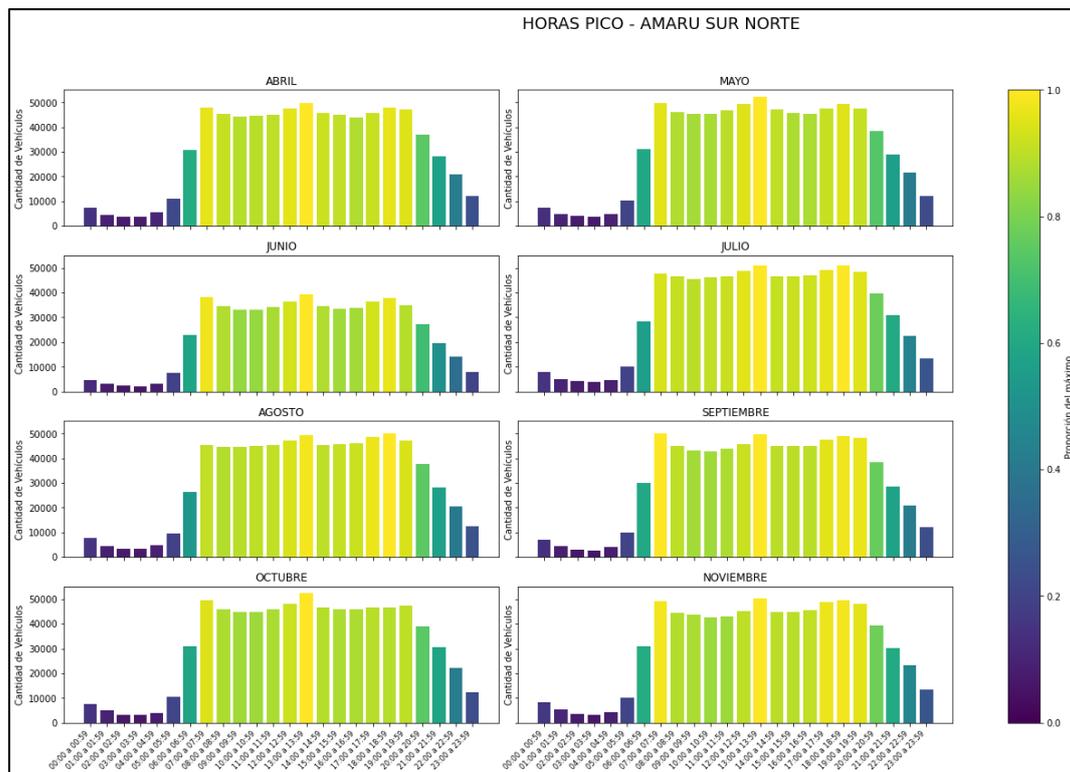


Figura 12

*Hora pico radar Amaru dirección Sur Norte.*



En el análisis de la Figura 11 se observa un flujo constante de vehículos durante el mes de agosto, particularmente los lunes, martes y miércoles. Esta constancia en el flujo vehicular sugiere que la vía sigue la misma dirección y no experimenta un significativo ingreso o salida de vehículos.

Destaca también que, durante el mes de octubre, los domingos presentan un mayor tránsito vehicular entre las 12:00 h y las 14:00 h. Esto puede inferirse como resultado del traslado de los usuarios hacia lugares de esparcimiento fuera de la ciudad, buscando alejarse de sus actividades cotidianas.

La Figura 12 revela un comportamiento similar al observado en los otros radares previamente analizados. Entre las 6:00 h y las 7:00 h se registra un incremento en la afluencia vehicular, coincidiendo con el inicio de las actividades diarias de los usuarios. Por otro lado, entre las 20:00 h y las 22:00 h se observa una disminución en el tráfico, lo que sugiere que es el periodo en el que las personas retornan a sus hogares.

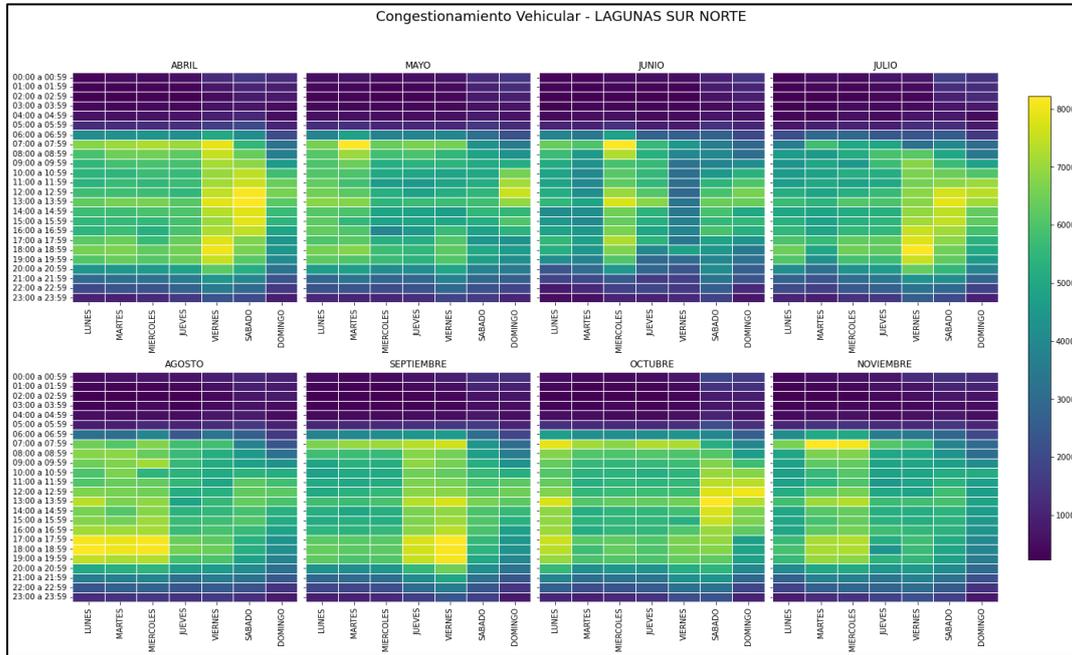
### 3.1.4. Radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.874521, Longitud: -78.939703

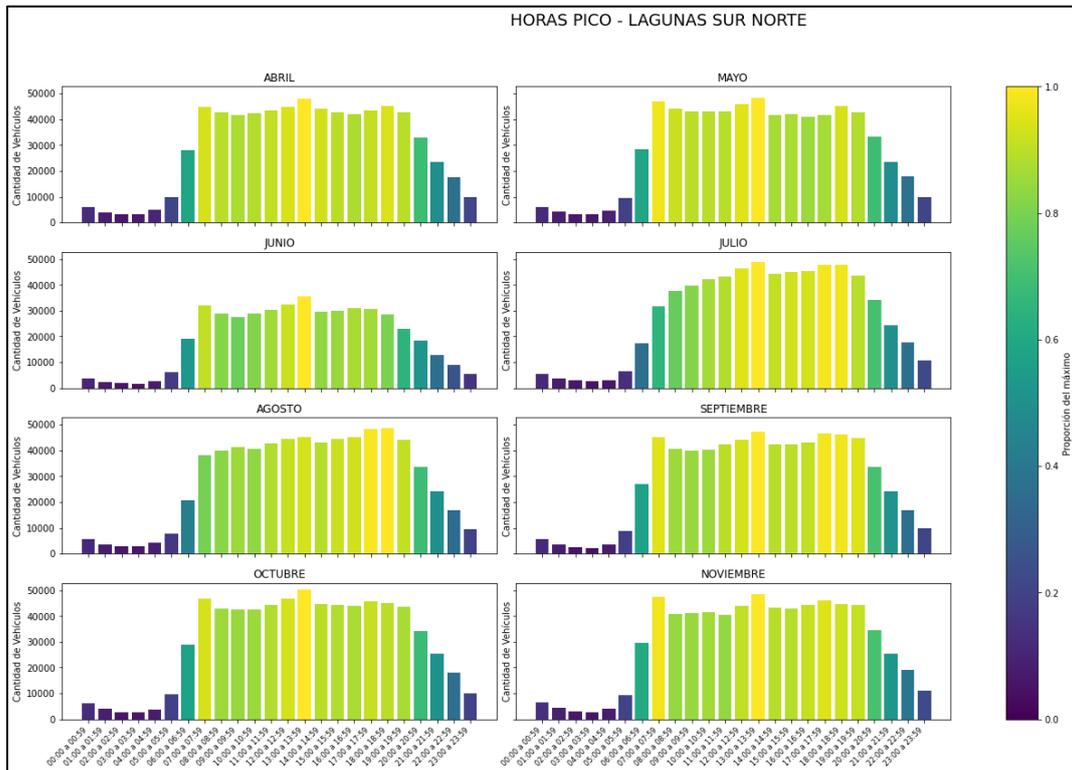
**Figura 13**

*Congestionamiento vehicular radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte.*



**Figura 14**

*Hora pico radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte.*



En el análisis de la Figura 13 de congestión vehicular, se observa que en el mes de abril se registran picos significativos los sábados alrededor de las 13:00 h, así como los viernes en la mañana, tarde y noche. Además, se destaca que los meses de mayo, junio, julio y octubre presentan una mayor cantidad de vehículos en la vía en comparación con los otros radares previamente analizados. Asimismo, se nota un leve uso de la autopista Cuenca – Azogues en horario nocturno, desde las 22:00 h en adelante, particularmente los viernes y sábados de la mayoría de los meses.

La Figura 14 muestra un comportamiento regular en los horarios, similar a otros radares. No obstante, es destacable que en el mes de julio no se registra un pico marcado entre las 7:00 h y las 8:00 h, como ocurre en los demás meses. Esta anomalía sugiere que durante julio pudo haber retrasos en el tránsito o que las personas optaron por utilizar rutas alternativas.

### 3.1.5. Radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.854492, Longitud: -78.916279

**Figura 15**

*Congestionamiento vehicular radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte.*

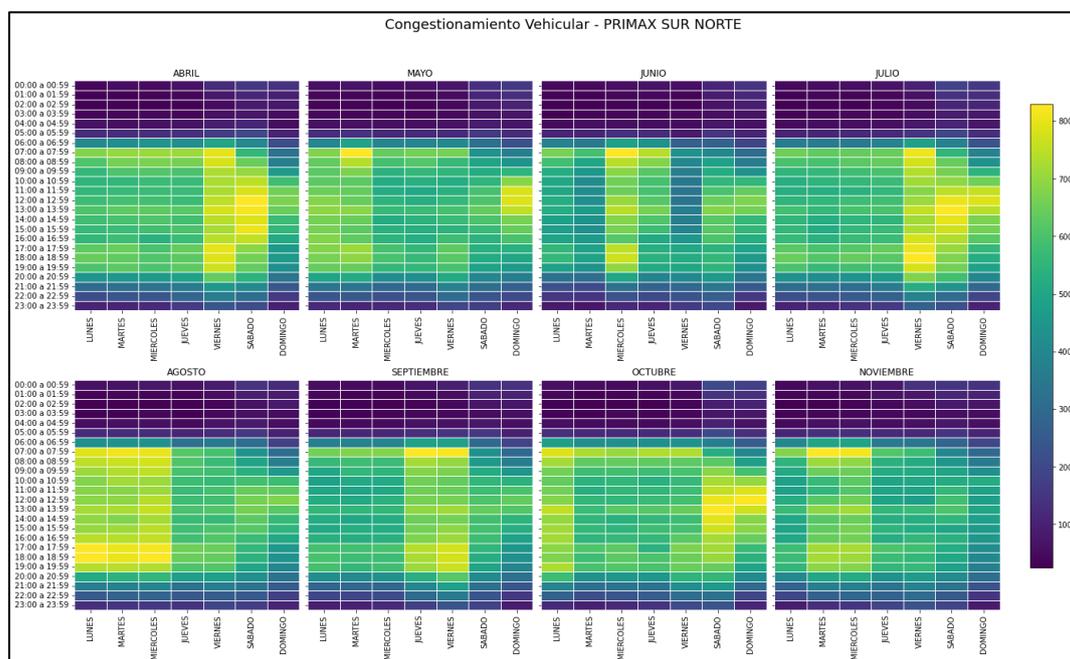
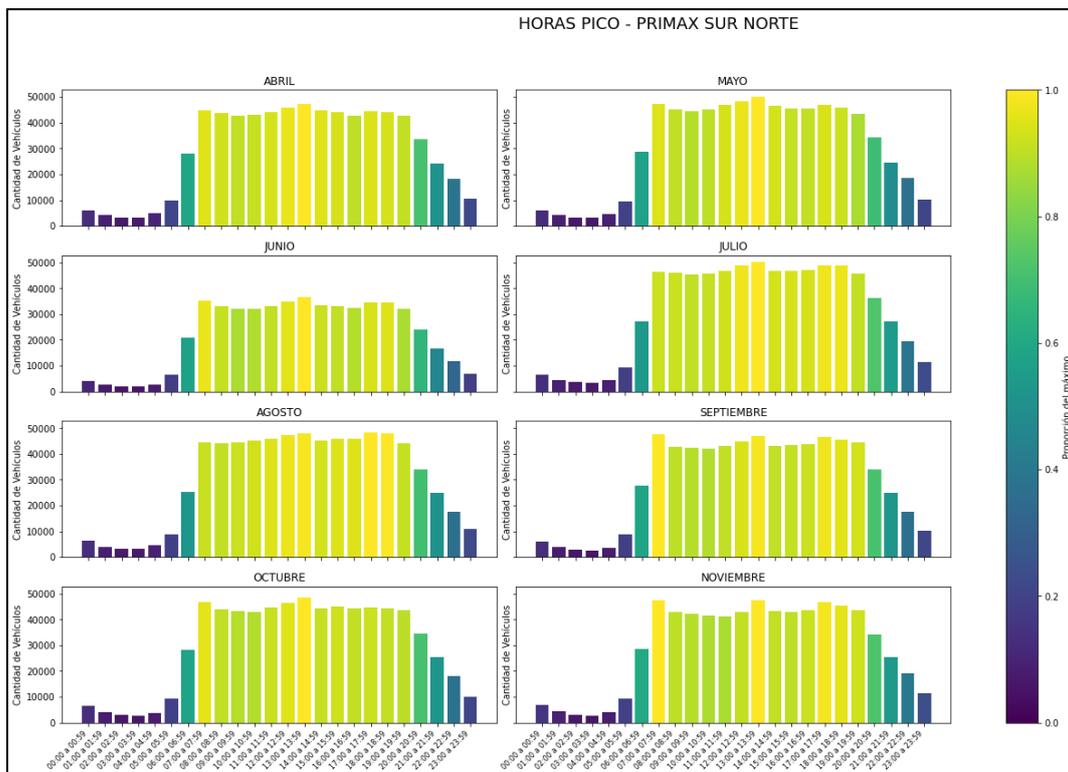


Figura 16

*Hora pico radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte.*



El análisis de la Figura 15 sobre el congestionamiento vehicular revela que los domingos de los meses de mayo, julio y octubre son los más congestionados. En el mes de mayo, aunque no se observa un horario de congestión vehicular tan pronunciado, se registra un pico entre las 7:00 h y las 8:00 h los martes, con aproximadamente 8000 vehículos. Además, se observa que el patrón de congestión los lunes, martes y miércoles en el mes de agosto se repite de manera consistente.

En cuanto a la Figura 16 del radar ubicado en la gasolinera Primax en dirección Sur-Norte, se destaca que el mes de septiembre presenta la mayor cantidad de vehículos, con alrededor de 50000 usuarios entre las 7:00 h y las 8:00 h.

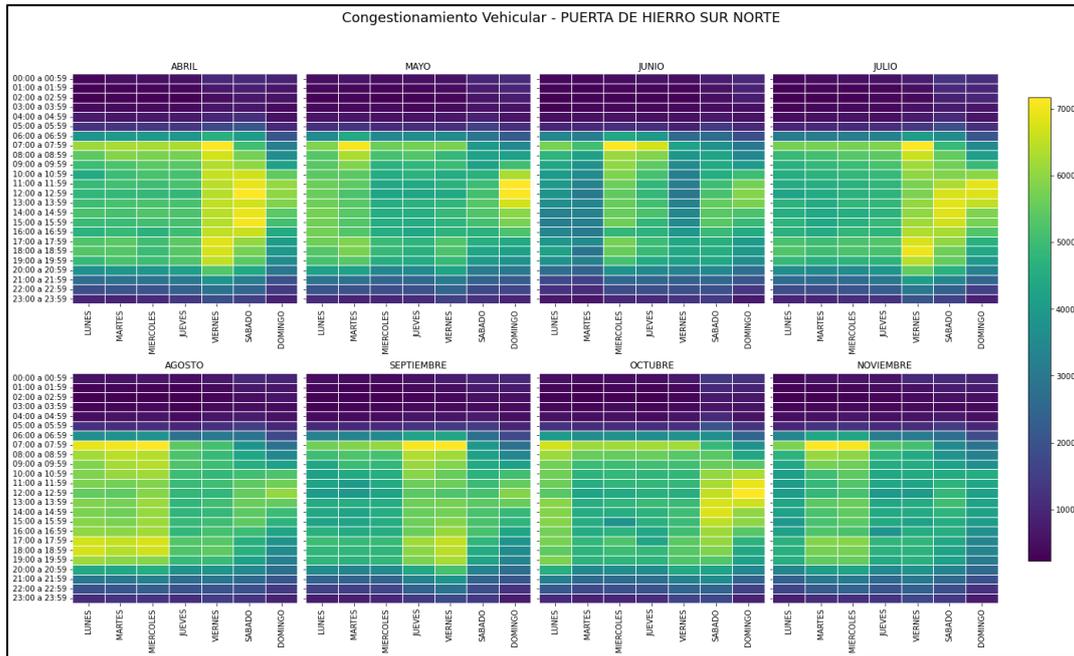
### 3.1.6. Radar Puerta de Hierro dirección Sur Norte

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.848867, Longitud: -78.896558

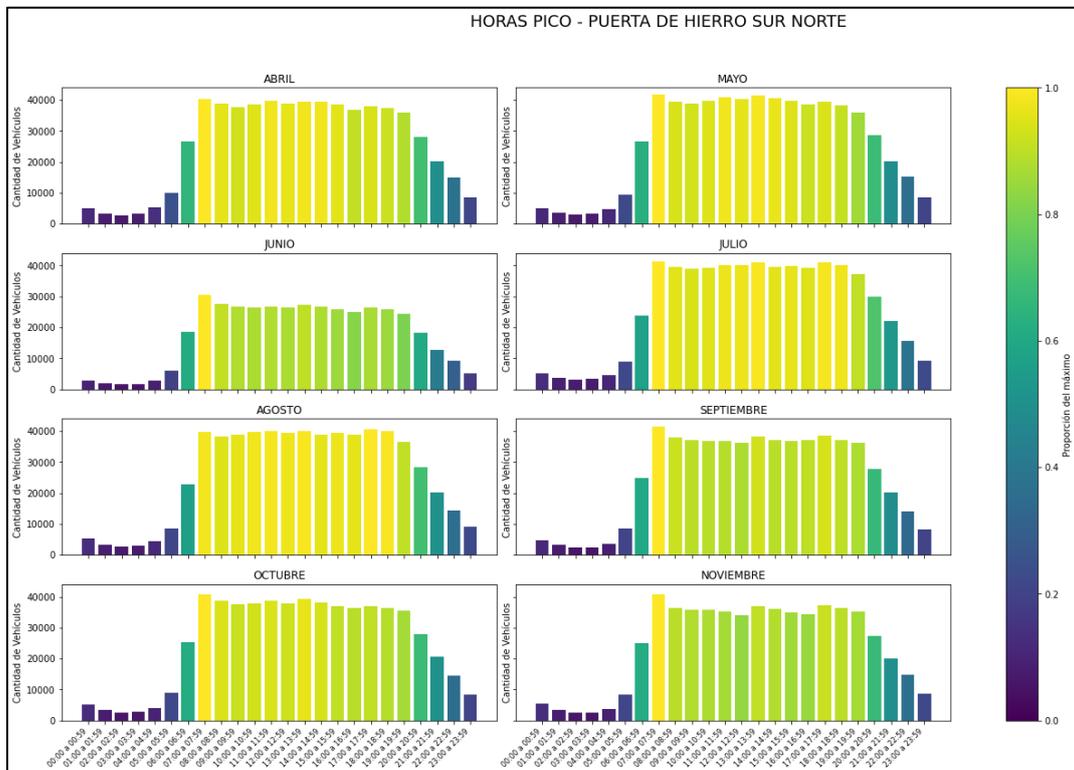
**Figura 17**

*Congestionamiento vehicular radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte.*



**Figura 18**

*Hora pico radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte.*



El análisis de la Figura 17 de congestión vehicular revela un incremento notable los sábados de los meses de abril, julio y octubre. Entre estos, el mes de abril destaca por presentar un rango de horas con congestión vehicular más prolongado, registrando alrededor de 7000 usuarios. Esta observación sugiere que el sábado es un día propicio para actividades familiares, con desplazamientos fuera de la ciudad hacia destinos como Azogues, Paute, Gualaceo, entre otros. Además, se observan valores elevados para el horario de las 7:00 h a las 8:00 h durante el mes de septiembre (jueves y viernes), así como en el mes de noviembre (martes y miércoles).

En relación con la Figura 18, se destaca que ninguno de los meses presenta un número de vehículos que sobrepase los 40000. Es relevante mencionar que en el mes de junio se registra un pico entre las 7:00 h y las 8:00 h, y posteriormente la cantidad de vehículos disminuye, sin volver a presentarse picos durante la tarde y noche como es habitual en otros gráficos analizados.

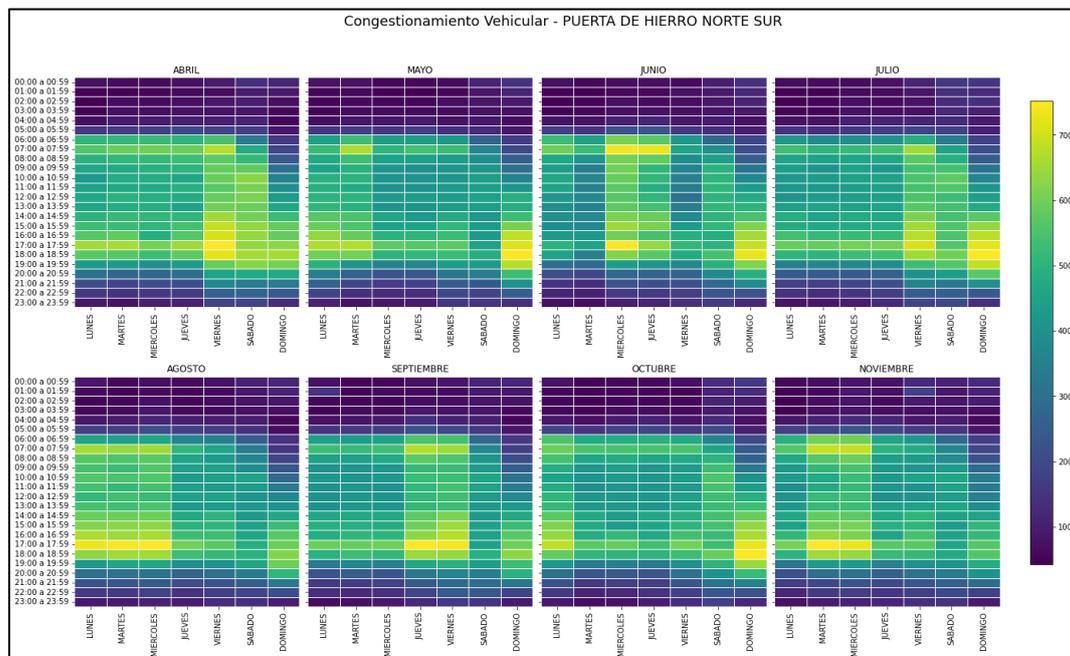
### 3.1.7. Radar Puerta de Hierro dirección Norte Sur

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.848875, Longitud: -78.896626

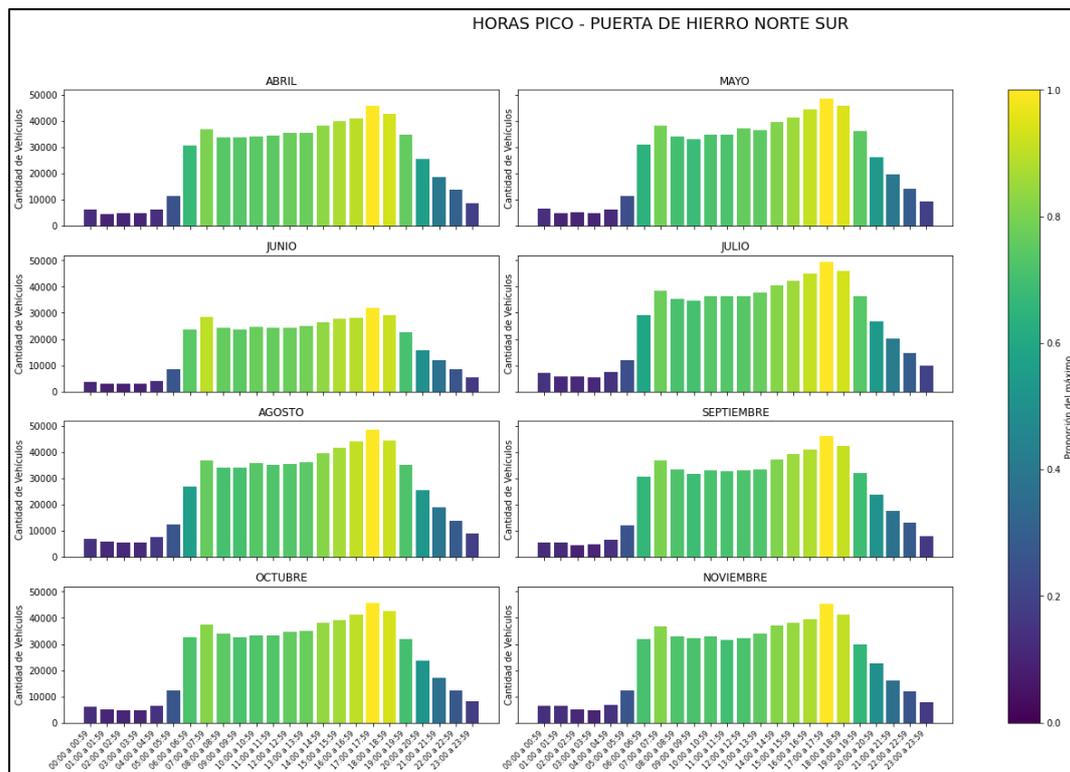
**Figura 19**

*Congestionamiento vehicular radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Norte Sur.*



**Figura 20**

*Hora pico radar Urbanización Puerta Hierro dirección Norte Sur.*



La Figura 19 de congestión vehicular revela un incremento significativo los domingos a partir de las 16:00 h, especialmente durante los meses de mayo, junio, julio y octubre. Se infiere que este aumento de tráfico corresponde al retorno a la ciudad de Cuenca por parte de los usuarios, quienes regresan para retomar sus actividades cotidianas tras pasar el fin de semana fuera de la ciudad.

Durante la semana laboral, no se observan variaciones significativas en el comportamiento de los usuarios, con leves incrementos en la afluencia vehicular por la mañana, entre las 7:00 h y las 8:00 h, y por la tarde, entre las 17:00 h y las 18:00 h. Esto sugiere la presencia de personas que realizan actividades tanto en Cuenca como fuera de la ciudad, o viceversa.

En contraste con los radares previamente analizados, la Figura 20 presenta solo dos picos en lugar de tres. Se infiere que los usuarios no utilizan mayormente este tramo de la autopista durante la hora del almuerzo.

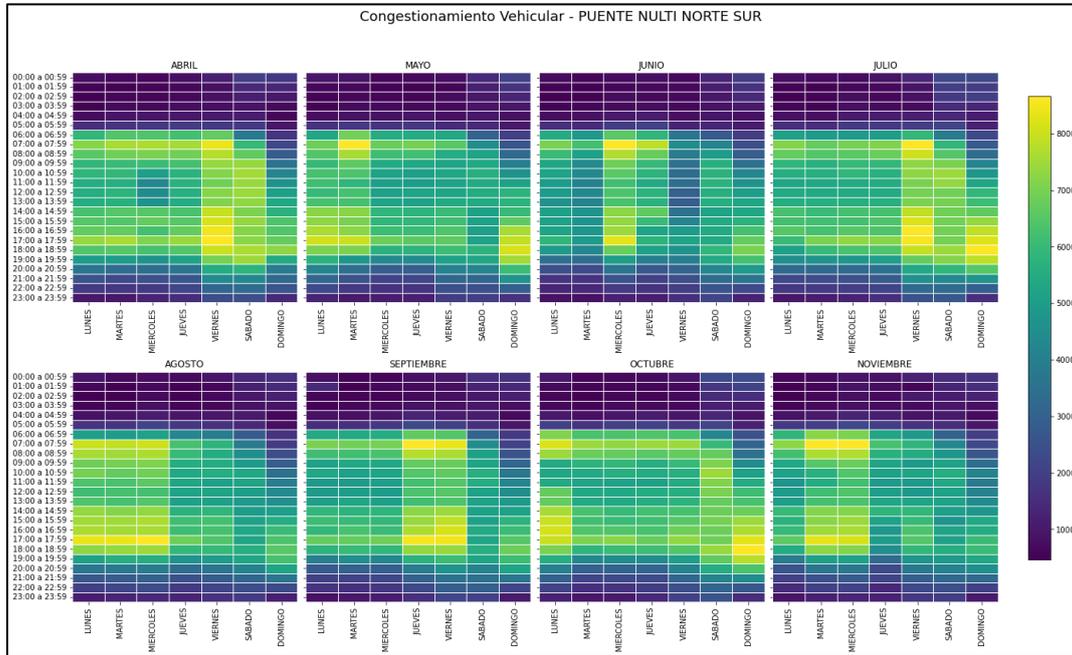
### 3.1.8. Radar Puente de Nulti dirección Norte Sur

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.861028, Longitud: -78.927493

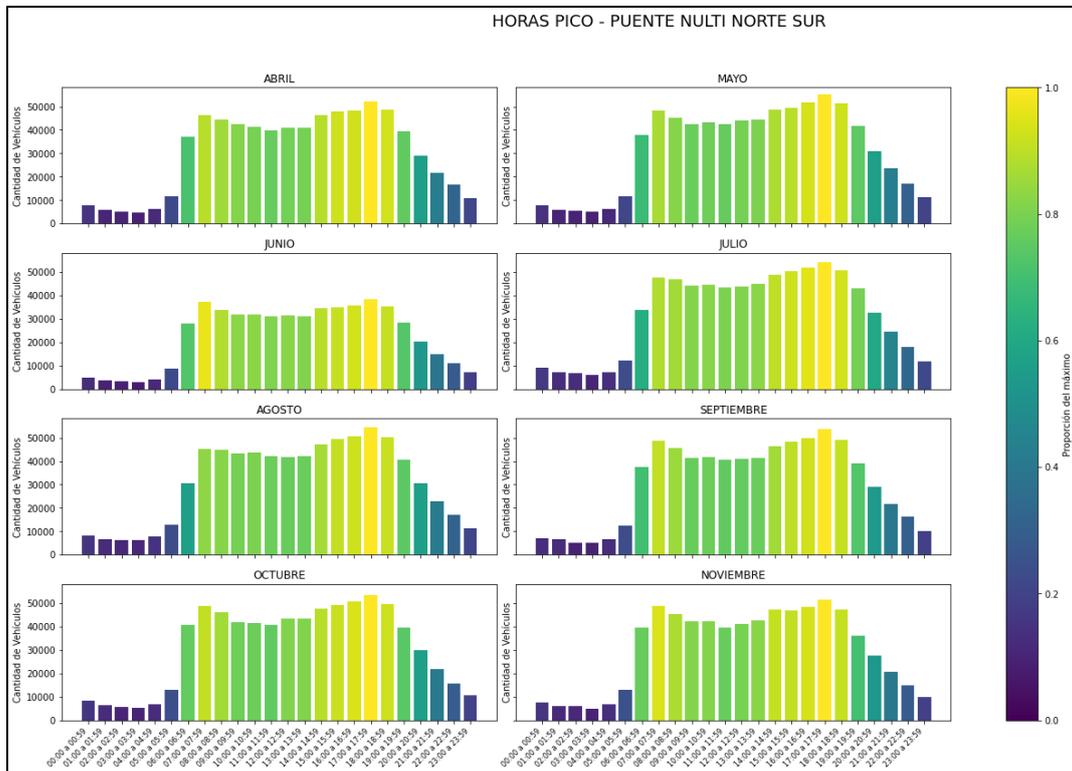
**Figura 21**

*Congestionamiento vehicular radar Puente de Nulti dirección Norte Sur.*



**Figura 22**

*Hora pico radar Puente de Nulti dirección Norte Sur.*



El análisis de la Figura 21 indica que el mes de abril registra el mayor nivel de congestión, sugiriendo que este fenómeno podría estar relacionado con festividades locales en Cuenca. Se observa que los viernes presentan el mayor número de vehículos, especialmente en la tarde a partir de las 15:00 h. Además, al igual que en otros radares, se identifican picos de congestión los domingos por la tarde durante los meses de mayo y julio. Es relevante destacar que en los viernes del mes de junio no se observa una congestión significativa, indicando un bajo tránsito vehicular en esta parte de la carretera.

En cuanto a la Figura 22, se evidencian dos picos, siendo el de la tarde más notorio. Además, se registra un desplazamiento considerable a partir de las 7:00 h, aunque también se observa una notable actividad a las 6:00 h, lo cual se atribuye al tiempo necesario para que los usuarios lleguen a sus destinos.

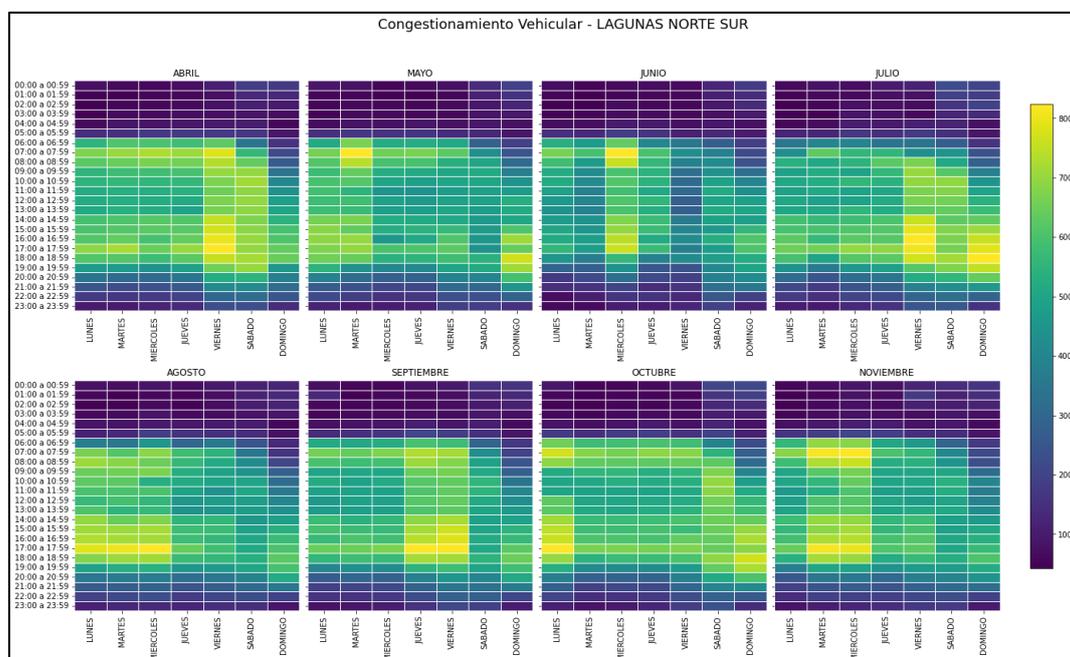
### 3.1.9. Radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.874535, Longitud: -78.939701

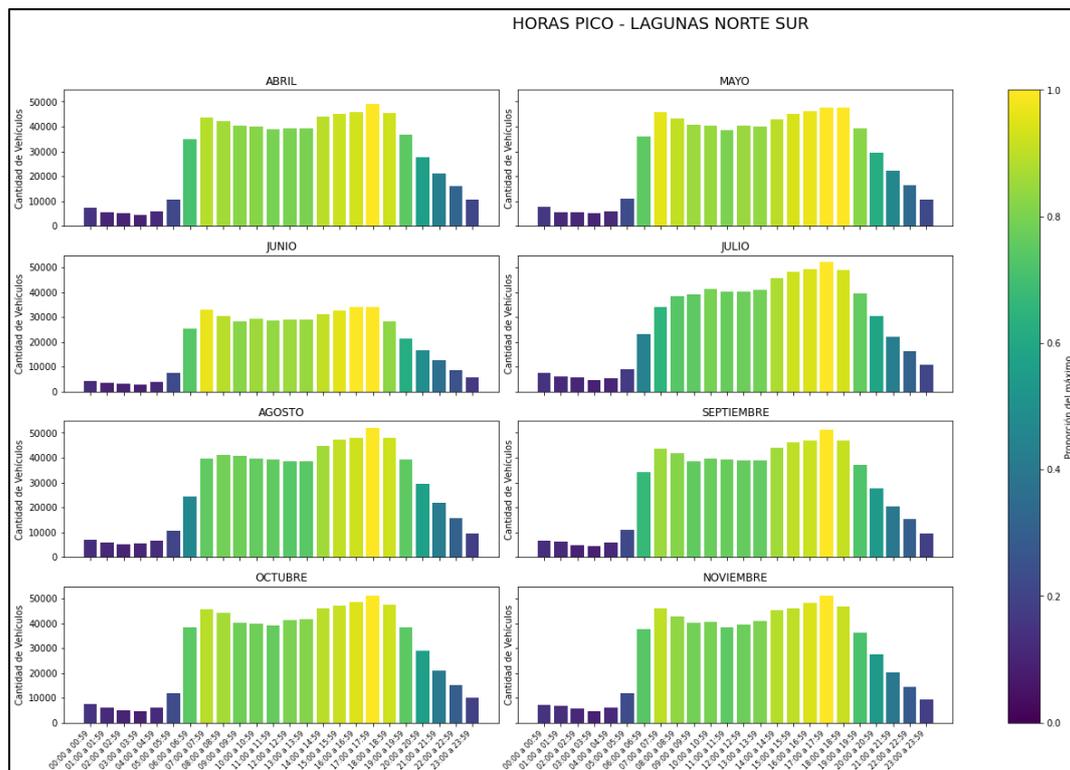
**Figura 23**

*Congestionamiento vehicular radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur.*



**Figura 24**

*Hora pico radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur.*



El análisis de la Figura 23 de congestionamiento vehicular revela una afluencia más constante durante el mes de abril, con picos destacados los viernes en el horario de 16:00 a 18:00 h. Se observa que el mes de mayo presenta el menor nivel de congestión vehicular. A diferencia de otros radares donde los domingos no muestran una congestión significativa, en este radar se registra un número considerable de vehículos en la carretera todos los meses. Es importante destacar que no se observa un flujo vehicular considerable en el horario matutino, lo cual podría atribuirse al día de descanso, con las personas prefiriendo salir de sus hogares unas horas más tarde.

En relación con la Figura 24 de horas pico, se observa que de 17:00 a 18:00 h se registran los mayores picos en todos los meses. Se infiere que este intervalo horario coincide con la salida de la jornada laboral.

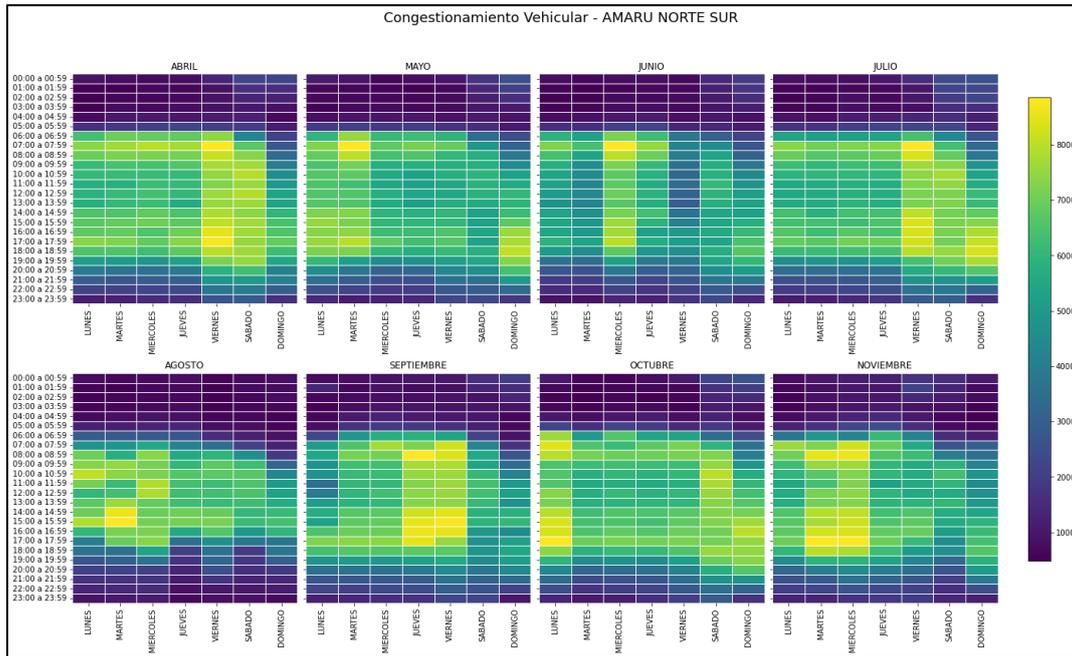
### 3.1.10. Radar Amaru dirección Norte Sur

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.891101, Longitud: -78.956526

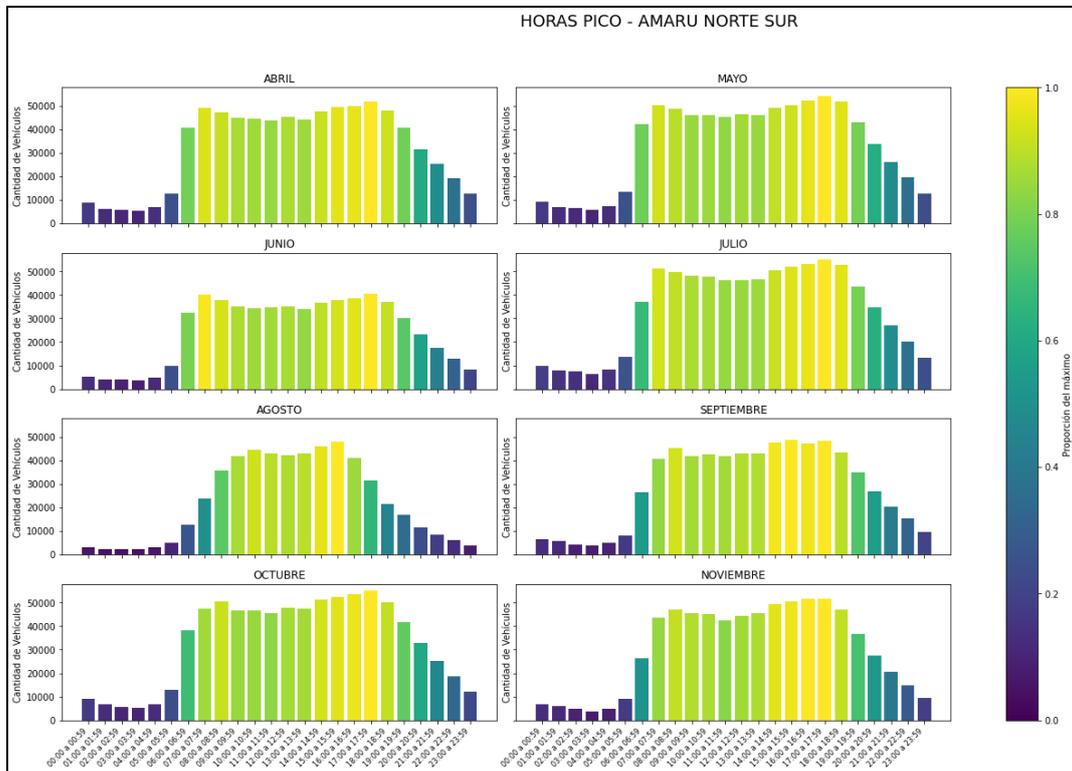
**Figura 25**

*Congestionamiento vehicular radar Amaru dirección Norte Sur.*



**Figura 26**

*Hora pico radar Amaru dirección Norte Sur.*



El análisis de la Figura 25 indica que el mes con mayor congestión es septiembre, evidenciado por un amplio rango de horas con alrededor de 8000 vehículos en la carretera los jueves y viernes. Se destaca que los viernes de junio no presentan un número significativo de usuarios. A pesar de cierta uniformidad en los domingos a lo largo de todos los meses estudiados, el mes de julio sobresale por la congestión observada de 18:00 h a 19:00 h. Sin embargo, no se registran congestiones durante las mañanas de los domingos, lo cual se atribuye al descanso que los usuarios suelen tener durante el fin de semana.

Mientras que en la Figura 26, el mes de noviembre resalta por un amplio horario de congestión de 14:00 h a 18:00 h, con una cantidad aproximada de 50000 vehículos. Similar a otros radares analizados en dirección Norte-Sur, se observan dos picos horarios (mañana y noche). No obstante, en el mes de agosto no se identifica un pico específico en la mañana, sino que el tráfico aumenta gradualmente.

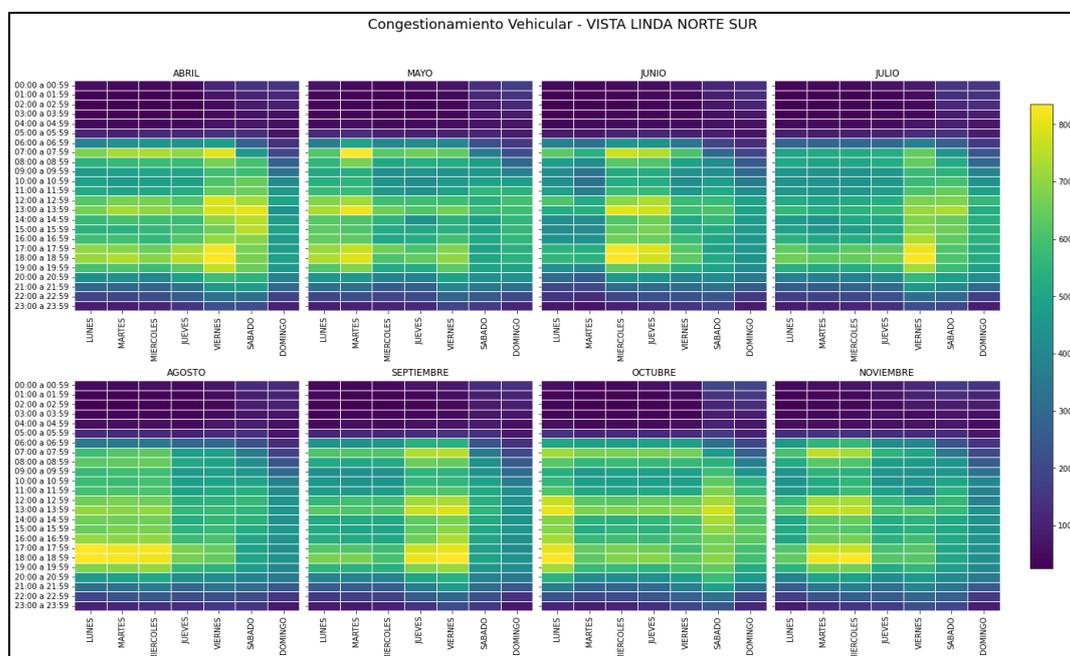
### 3.1.11. Radar Vista Linda dirección Norte Sur

El radar se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas:

Latitud: -2.921024, Longitud: -79.020221

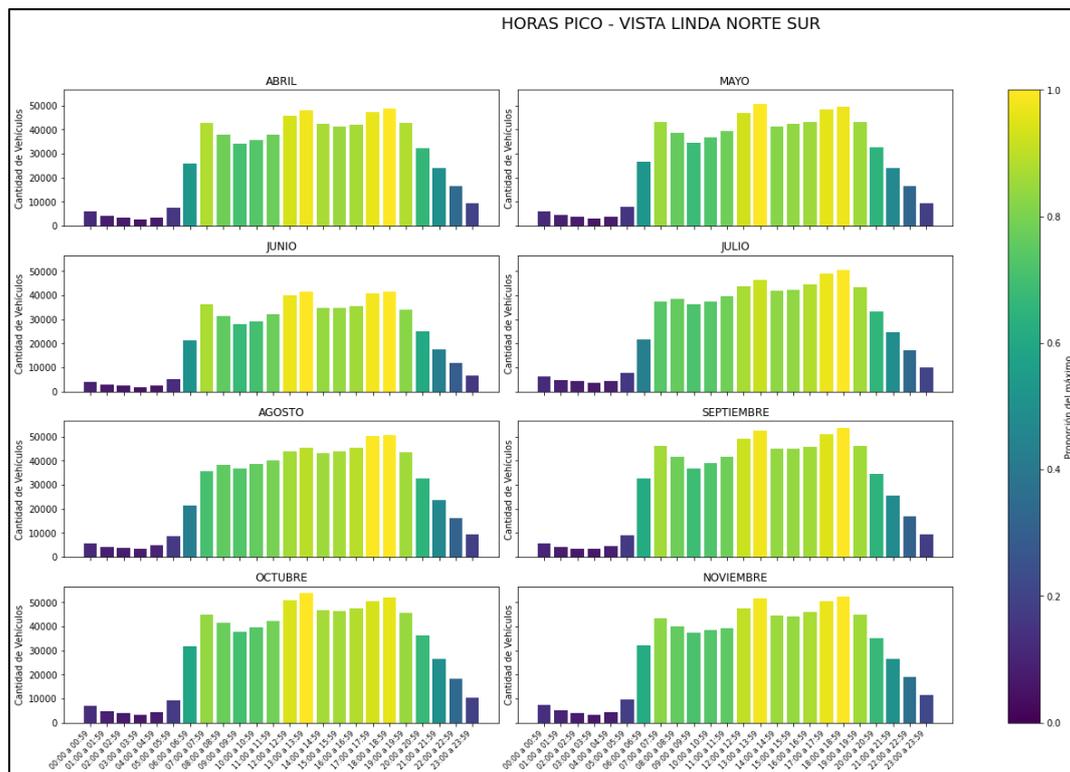
**Figura 27**

*Gestionamiento vehicular radar Vista Linda dirección Norte Sur.*



**Figura 28**

*Hora pico radar Vista Linda dirección Norte Sur.*



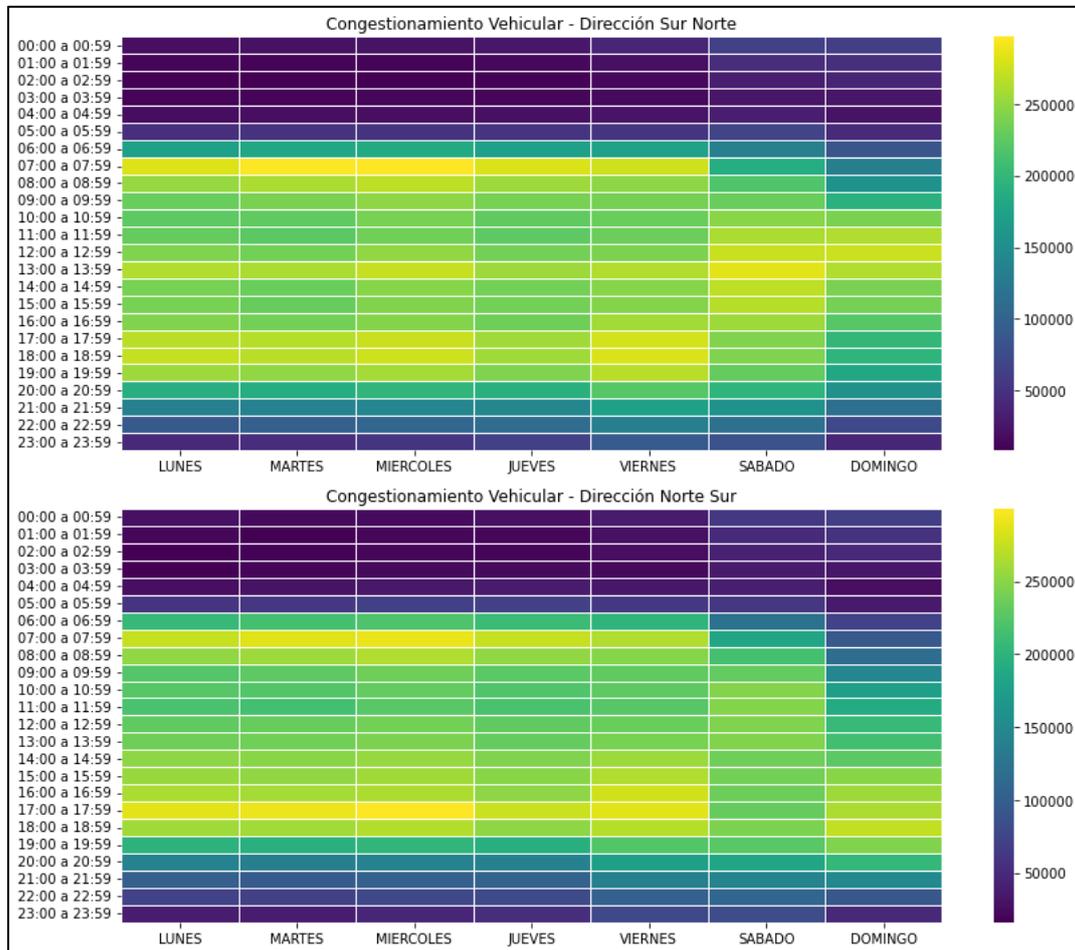
El análisis de la Figura 27 gráfico de congestión vehicular refleja un patrón similar al observado en los primeros radares con dirección Sur-Norte. Este fenómeno se atribuye a la ubicación relativamente centralizada del radar en la ciudad, lo que resulta en la identificación nuevamente de tres rangos distintivos de horas, divididos en mañana, tarde y noche. Se observa también una menor actividad los domingos, sugiriendo que las personas prefieren salir de la ciudad durante los fines de semana. Destaca el mes de agosto como el más congestionado, particularmente en el horario de 17:00 h a 19:00 h los lunes, martes y miércoles, con un aproximado de 8000 usuarios en la carretera.

En cuanto a la Figura 28, enfocándose en el mes de agosto, se evidencia un incremento gradual en la cantidad de vehículos a lo largo del día, alcanzando su punto máximo a las 17:00 h, con alrededor de 50000 vehículos registrados durante todo el mes.

## 3.1.12. Resultados agregados para cada dirección

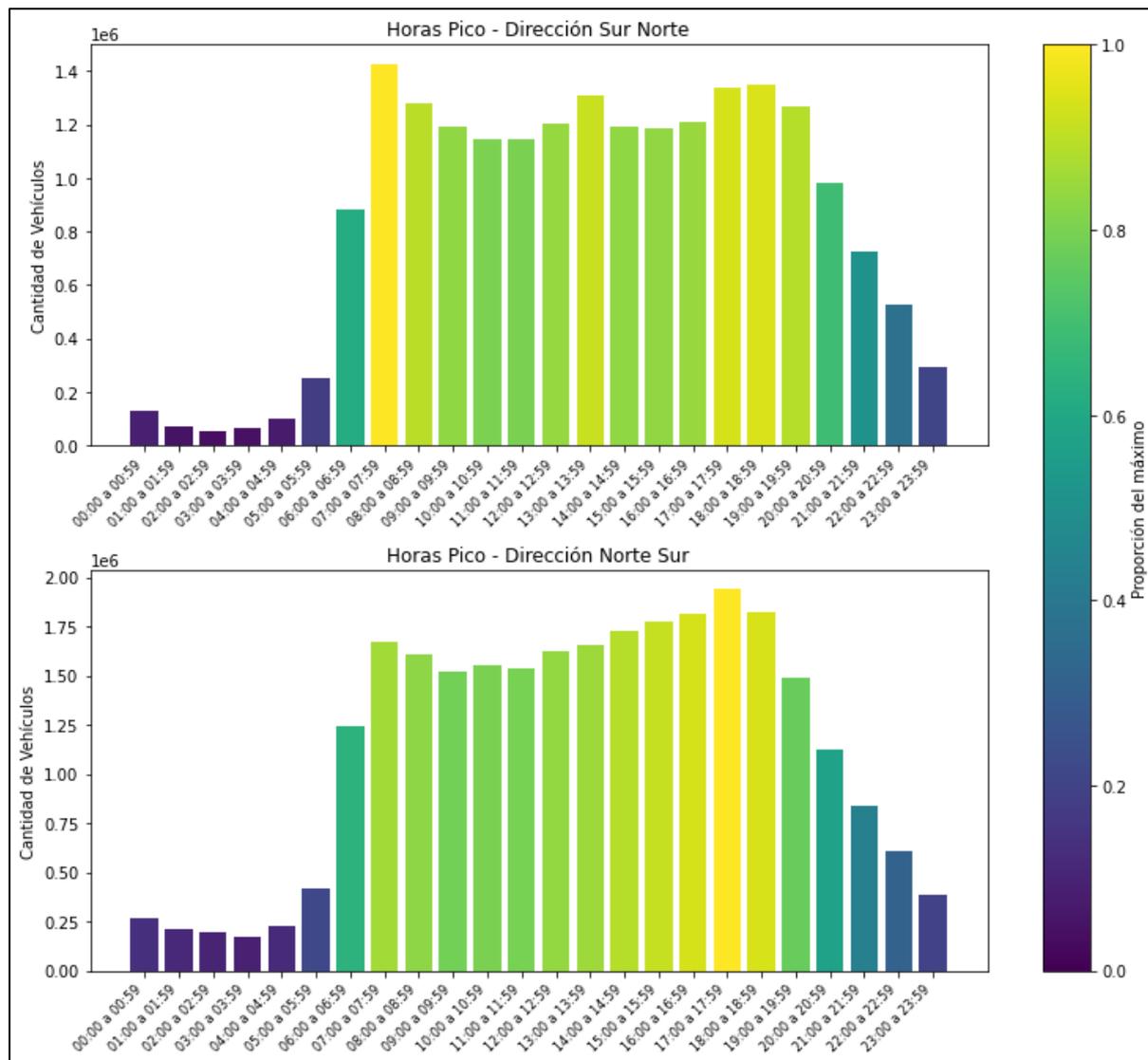
**Figura 29**

*Congestionamiento vehicular agregado para cada dirección.*



**Figura 30**

*Horas pico agregadas para cada dirección.*



La Figura 29 correspondiente al congestionamiento vehicular agregado muestra un bajo o nulo congestionamiento en las dos direcciones, entre las 23:00 h y 6:00 h. A partir de las 6:00 h hasta las 23:00 h se presenta una variación de congestión dependiendo de la hora del día, siendo los horarios de 7:00 h a 8:00 h y de 18:00 h a 19:00h.

Además, se aprecia que en la dirección Sur Norte el día que mayor congestionamiento presenta es el miércoles en el horario de 7:00h a 8:00h. Por otro lado, en la dirección Norte Sur, el día de mayor congestionamiento se mantiene en miércoles, pero el horario de mayor congestión se traslada de 17:00 h a 18:00 h.

Se debe tomar en cuenta también, la variación presentada en los días viernes y sábado. El horario de congestión cambia de las horas laborables que se presentan entre semana a un horario tardío y nocturno, lo que se puede relacionar con las actividades recreativas que se llevan a cabo en la ciudad durante esos días.

En cuanto a la Figura 30 de horas pico, donde se eliminó los días sábado y domingo, debido a que puede existir irregularidades en el tráfico, dando resultados que alteren el flujo entre semana que normalmente se tiene. Para lo cual se puede verificar que en la dirección Sur Norte existe el mayor pico de congestión en el horario de 7:00 h a 8:00 h. Mientras que en la dirección Norte Sur el intervalo de valores máximos se encuentra entre las 17:00 h y 18:00 h.

## **3.2. Análisis de Velocidades**

### **3.2.1. Estudio de Velocidad de Punto**

En esta sección, se presentan los cálculos realizados a partir de los datos de velocidad media recopilados en los puntos específicos de la carretera utilizando sensores de radar, según se describió en la sección anterior de metodología. El análisis se centra en identificar patrones de velocidad, medir la variabilidad de las velocidades y determinar percentiles clave que guían las decisiones sobre límites de velocidad y seguridad vial.

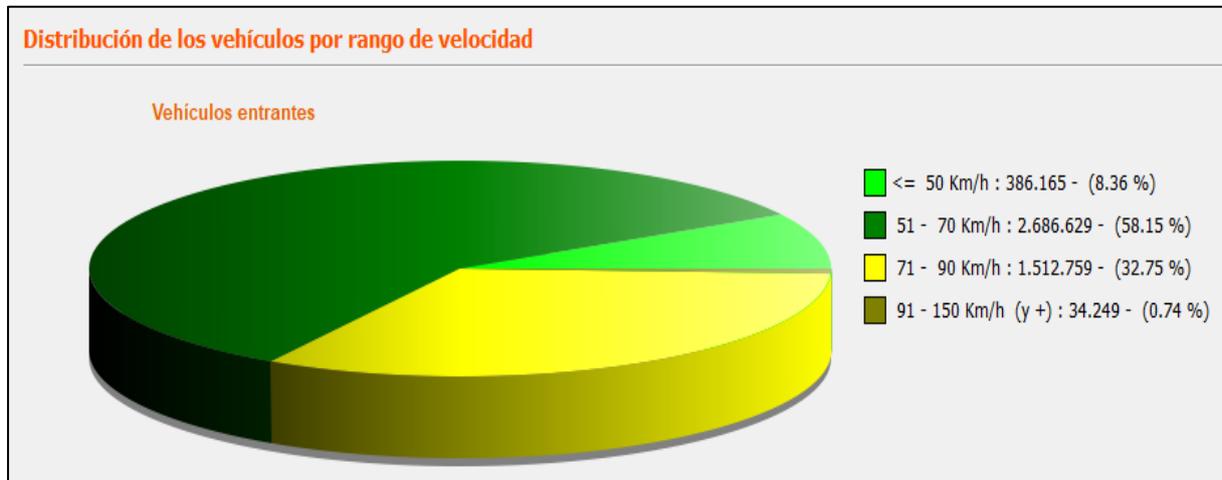
Se realiza un análisis comparativo con los rangos de velocidades obtenidos del programa Evograph, debido que este cuenta con cada una de las velocidades tomadas en el periodo abril – noviembre y se compara con las velocidades medias que son los datos visibles y disponibles para el análisis manual.

Mediante el programa Evograph se realizan gráficos de pastel para obtener una apreciación adecuada de las velocidades, analizando el porcentaje de los vehículos que sobrepasan el límite de velocidad permitido. Por otra parte, con los datos exportados de velocidades medias, se realizan gráficos que ilustran las distribuciones de velocidad, las frecuencias observadas, las velocidades medias y otros parámetros estadísticos relevantes para cada punto de medición, mediante el script realizado en Python “Velocidad de Punto” (ver anexo 1). El gráfico muestra las velocidades medias acumuladas, lo que significa que cada punto representa la velocidad promedio acumulada hasta ese momento en el período de tiempo analizado. En este contexto, se ha establecido que el percentil 15 corresponde al 15% de las velocidades más bajas, mientras que el percentil 50 representa la mediana, es decir, la velocidad que se encuentra en el punto medio de todas las velocidades. Por último, el percentil 85 indica la velocidad acumulada por encima del 85% de todas las velocidades registradas, y se ha definido como la velocidad límite máxima para este conjunto de datos.

### 3.2.1.1. Radar Vista Linda dirección Sur Norte

**Figura 31**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Vista Linda dirección Sur Norte.*



**Figura 32**

*Distribución de velocidades medias radar Vista Linda dirección Sur Norte.*

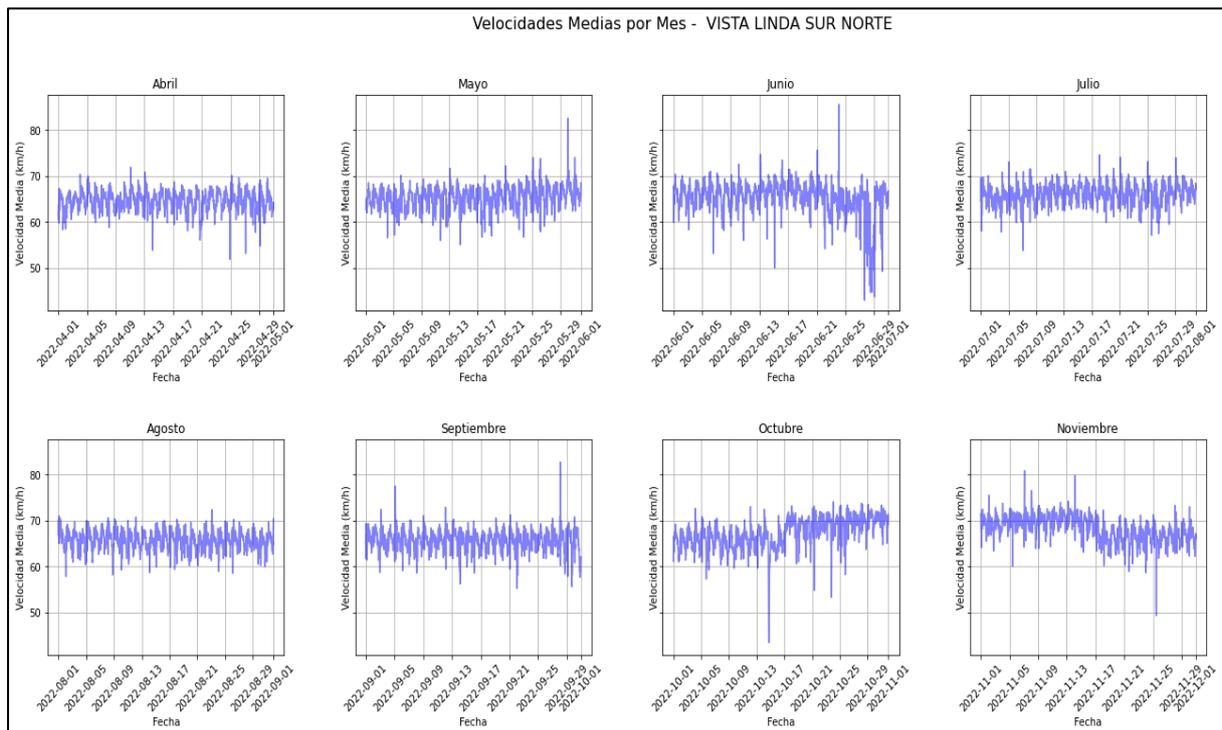
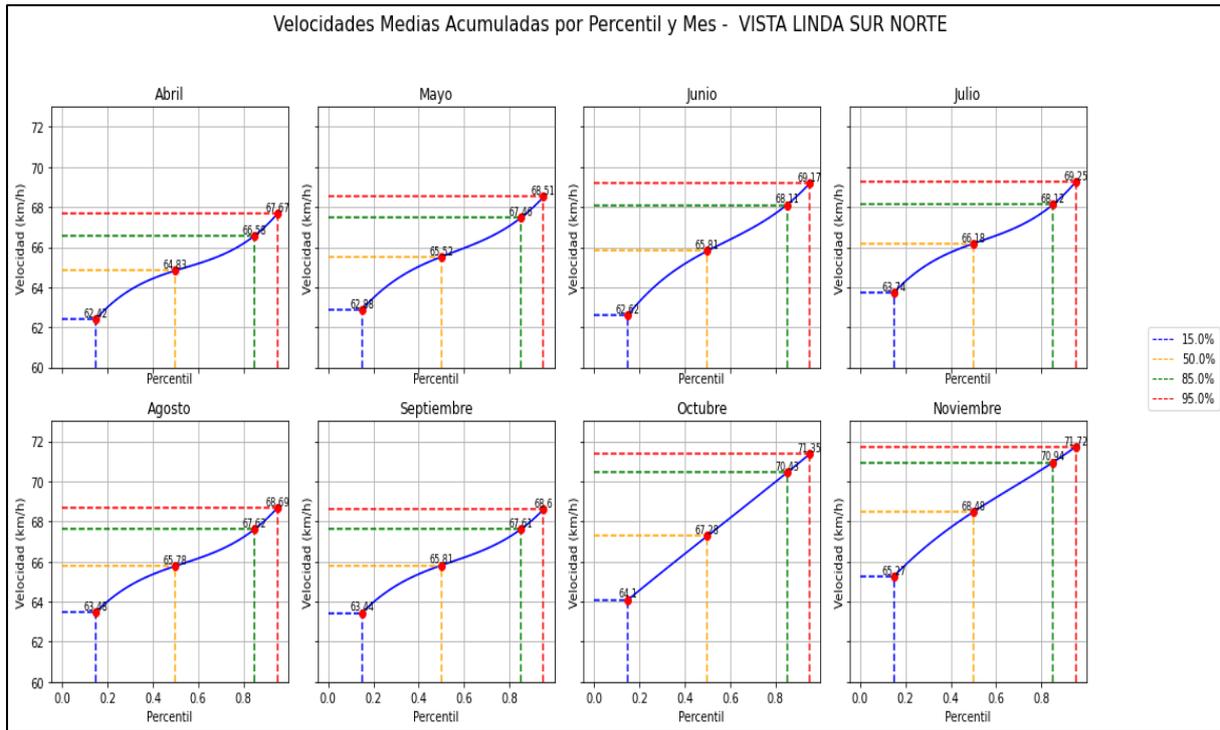


Figura 33

Percentiles de velocidad media acumulada radar Vista Linda dirección Sur Norte.



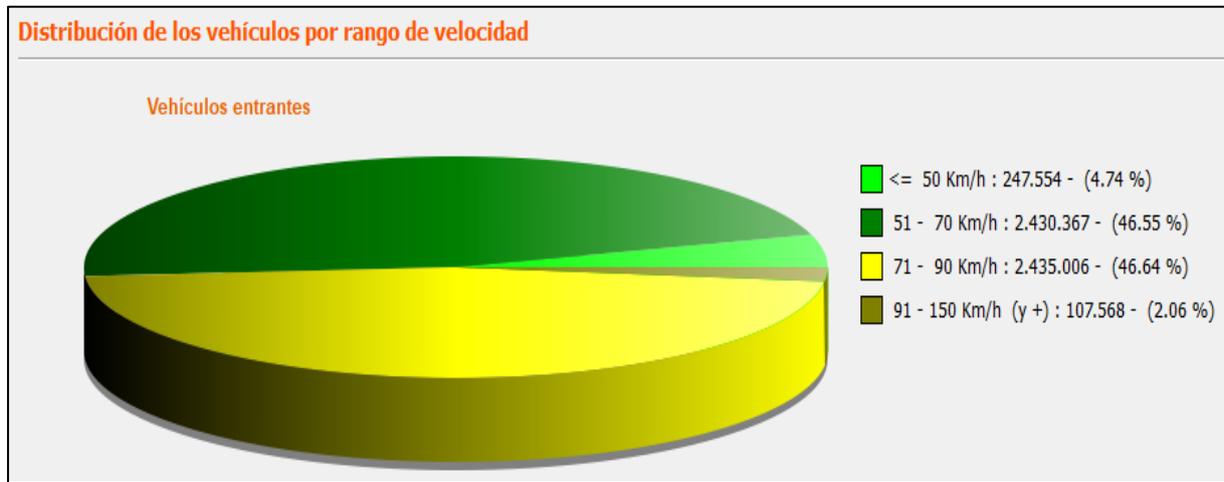
Se puede verificar en la Figura 31 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 4619802 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido sur norte sector Vista Linda, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 99.26% (4585553 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 0.74% (34249 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Se observa también en la Figura 32 que noviembre registra las mayores velocidades. Específicamente, se aprecia en la Figura 33 que la velocidad media acumulada en el percentil 85 es de 70.94 km/h, lo que supera ligeramente a los demás meses. Esto sugiere que durante noviembre hay más tiempo con velocidades por encima del límite máximo establecido en comparación con otros meses. Estas condiciones indican un tráfico más intenso y mayores velocidades promedio durante este período. Es importante tener en cuenta que estas velocidades son aproximadas, ya que se basan en promedios cada 30 minutos en el radar.

### 3.2.1.2. Radar Max Uhle dirección Sur Norte

**Figura 34**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Max Uhle dirección Sur Norte.*



**Figura 35**

*Distribución de velocidades medias radar Max Uhle dirección Sur Norte.*

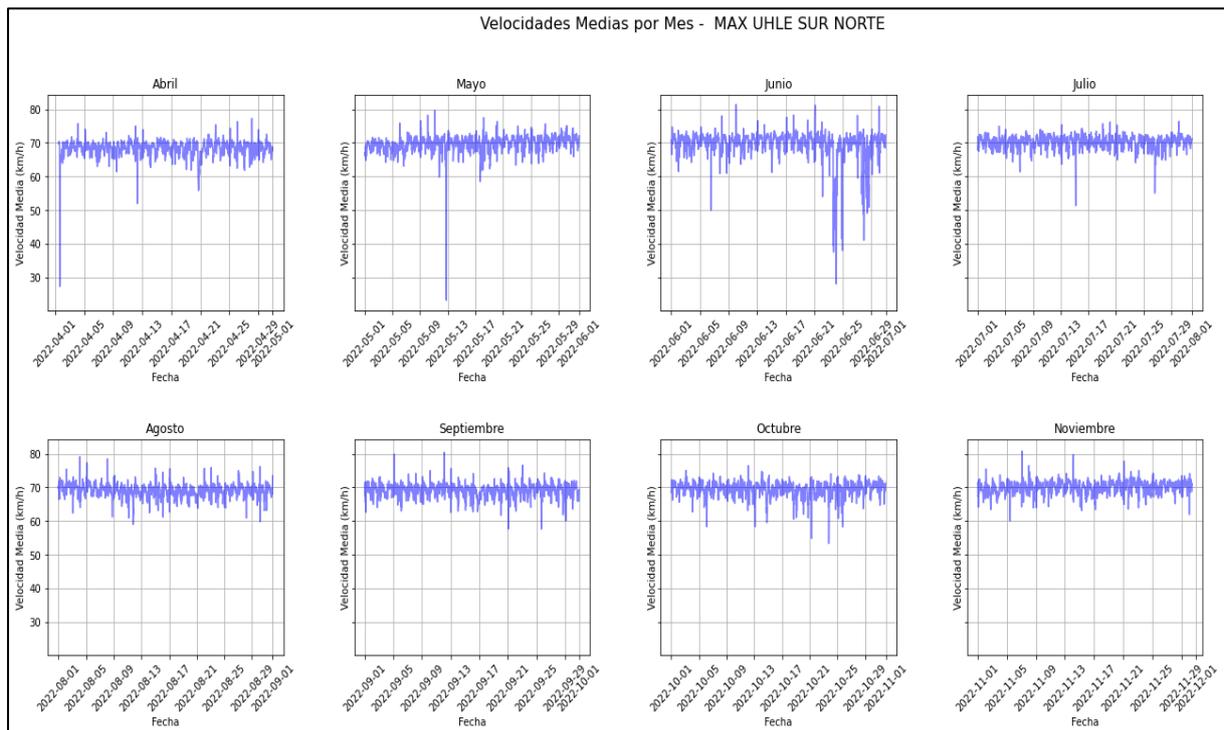
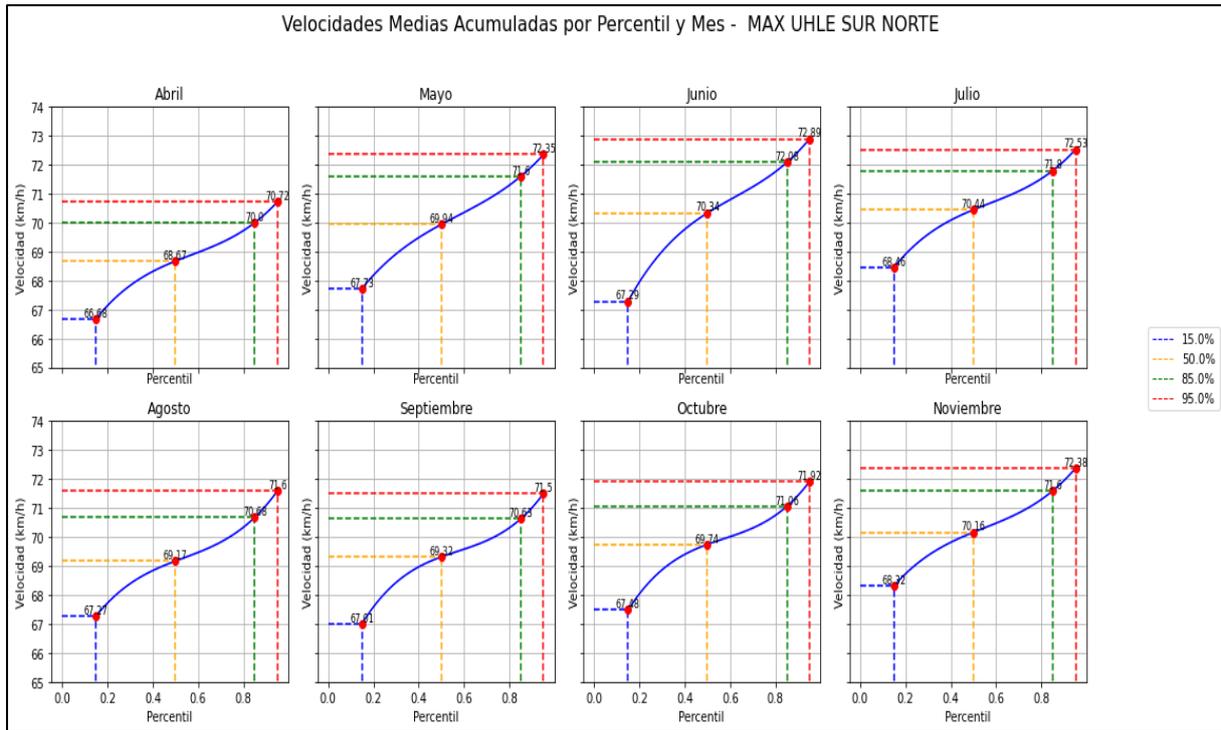


Figura 36

Percentiles de velocidad media acumulada radar Max Uhle dirección Sur Norte.



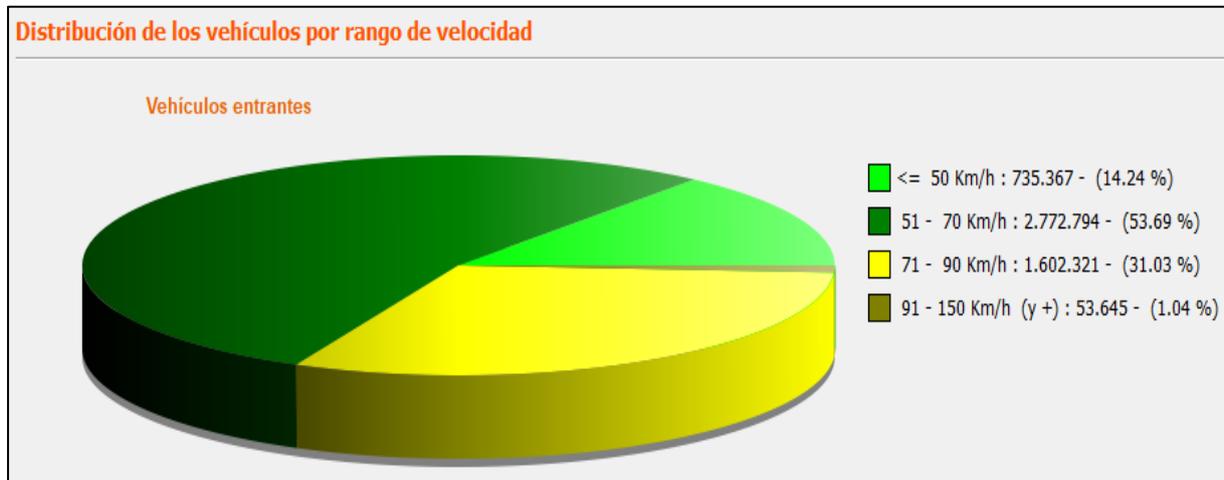
Se puede verificar en la Figura 34 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 5220495 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido sur norte sector Max Uhle, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 97.94% (5112927 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 2.06% (107568 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Se puede apreciar también en la Figura 35, que el mes de junio es el que presenta las mayores velocidades. En este caso, se muestra en la Figura 36 que la velocidad media acumulada en el percentil 85 de 72.08 km/h para junio es ligeramente superior a la de los otros meses, indicando que durante este período se experimenta una mayor proporción de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido, siendo la velocidad límite máxima para este conjunto de datos. Esto sugiere que durante este mes se producen condiciones de tráfico más intensas que generan mayores velocidades promedio acumuladas en comparación con otros meses del año, sin embargo, es un parámetro de velocidad aproximado puesto que se trabaja con velocidades medias por cada 30 minutos en el radar.

### 3.2.1.3. Radar Amaru dirección Sur Norte

**Figura 37**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Amaru dirección Sur Norte.*



**Figura 38**

*Distribución de velocidades medias radar Amaru dirección Sur Norte.*

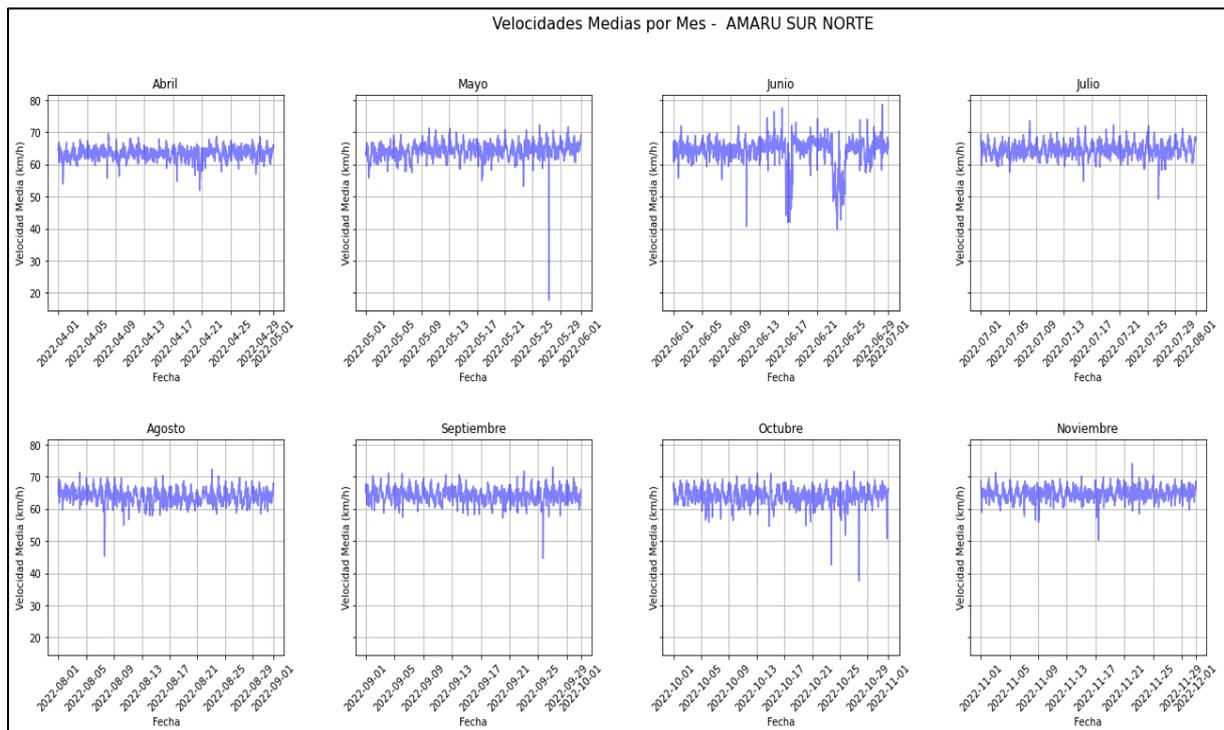
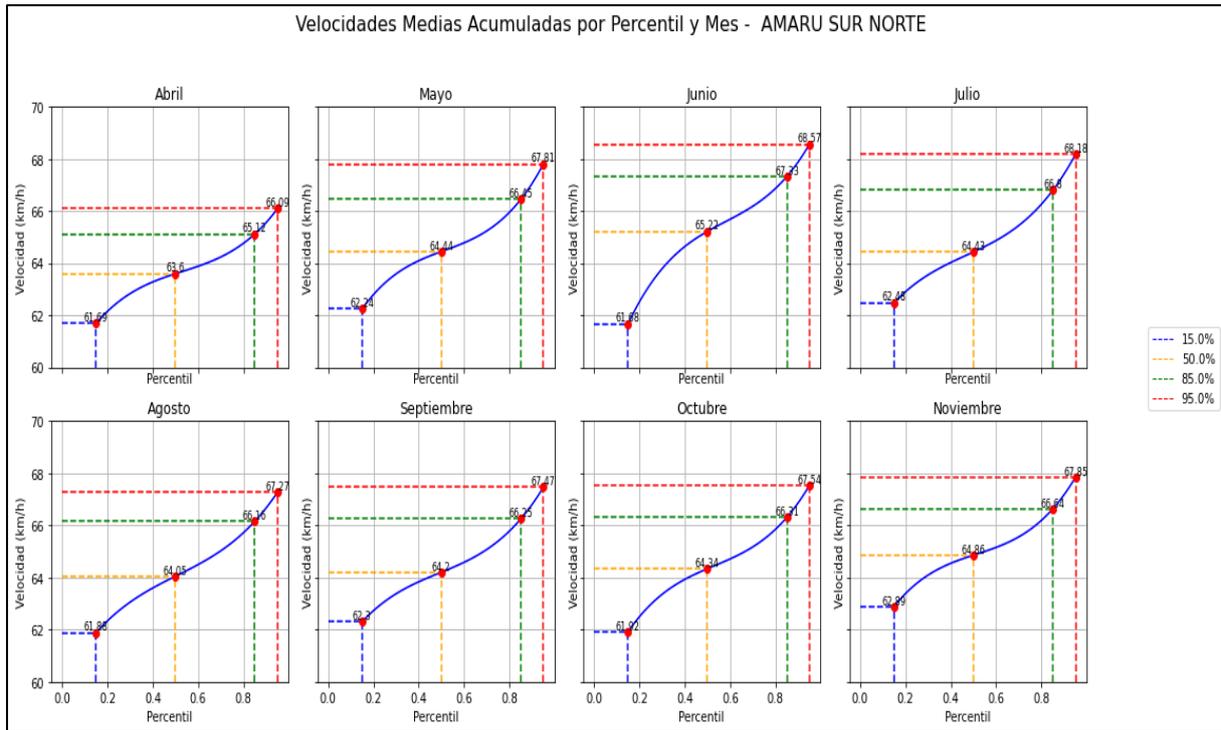


Figura 39

Percentiles de velocidad media acumulada radar Amaru dirección Sur Norte.



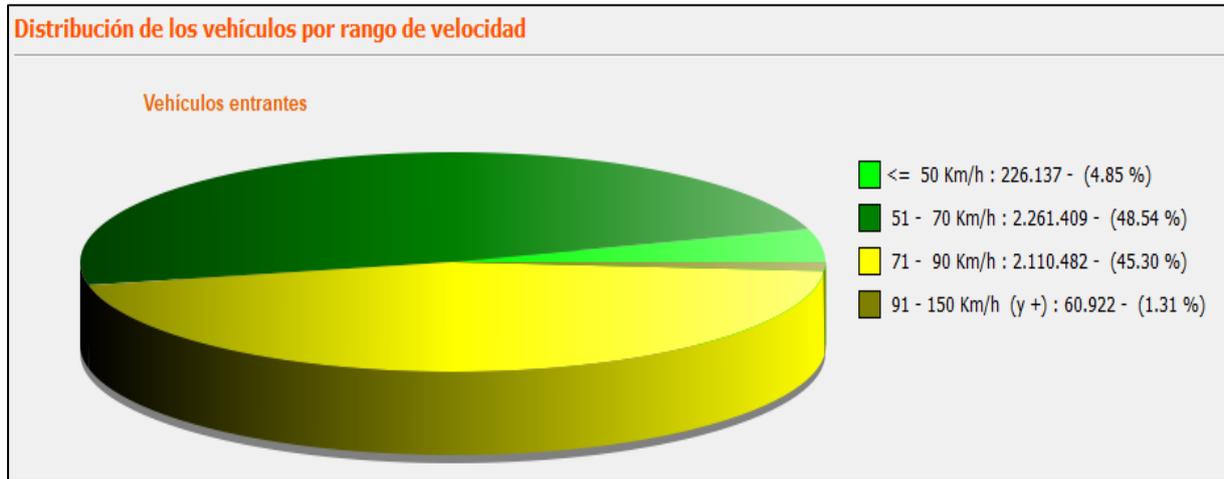
Se puede verificar en la Figura 37 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 5164127 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido sur norte sector Amaru, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 98.96% (5110482 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 1.04% (53645 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Se puede apreciar también en la Figura 38, que el mes de junio es el que presenta las mayores velocidades. En este caso, como se muestra en la Figura 39, la velocidad media acumulada en el percentil 85 de 67.33 km/h para junio es ligeramente superior a la de los otros meses, indicando que durante este período se experimenta una mayor proporción de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido, siendo la velocidad límite máxima para este conjunto de datos. Esto sugiere que durante este mes se producen condiciones de tráfico más intensas que generan mayores velocidades promedio acumuladas en comparación con otros meses del año, sin embargo, es un parámetro de velocidad aproximado puesto que se trabaja con velocidades medias por cada 30 minutos en el radar.

### 3.2.1.4. Radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte

**Figura 40**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte.*



**Figura 41**

*Distribución de velocidades medias radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte.*

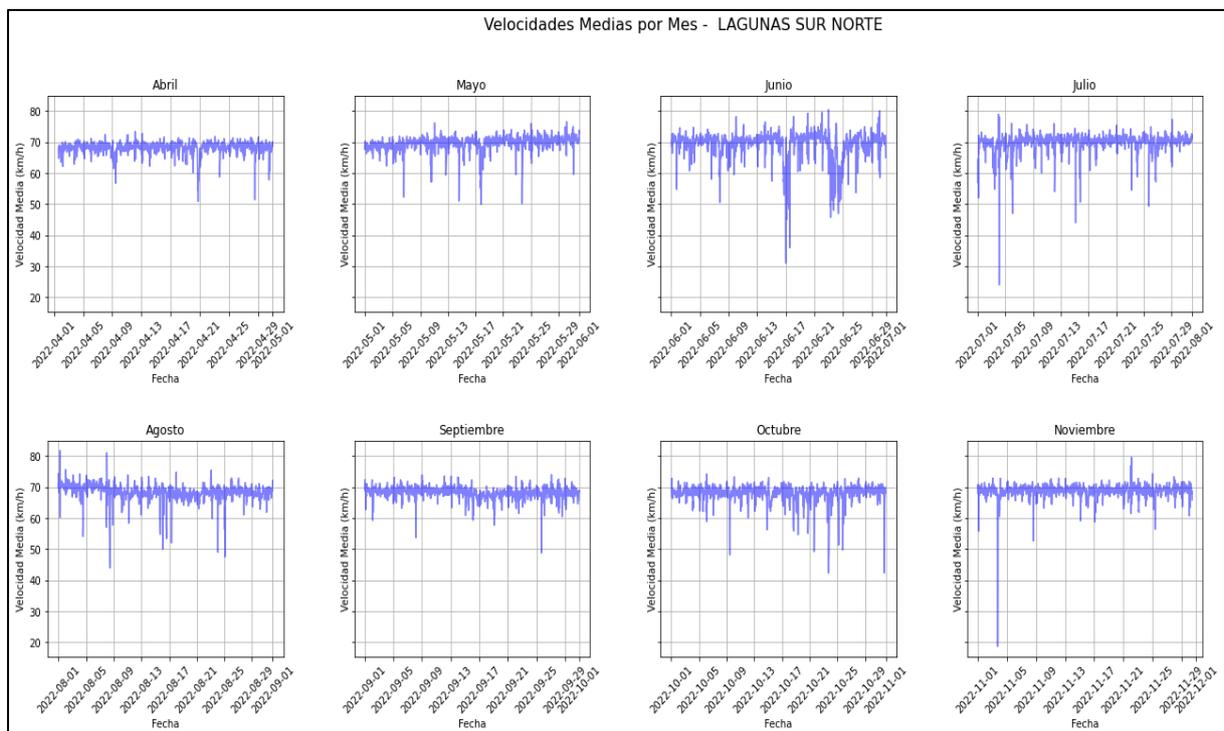
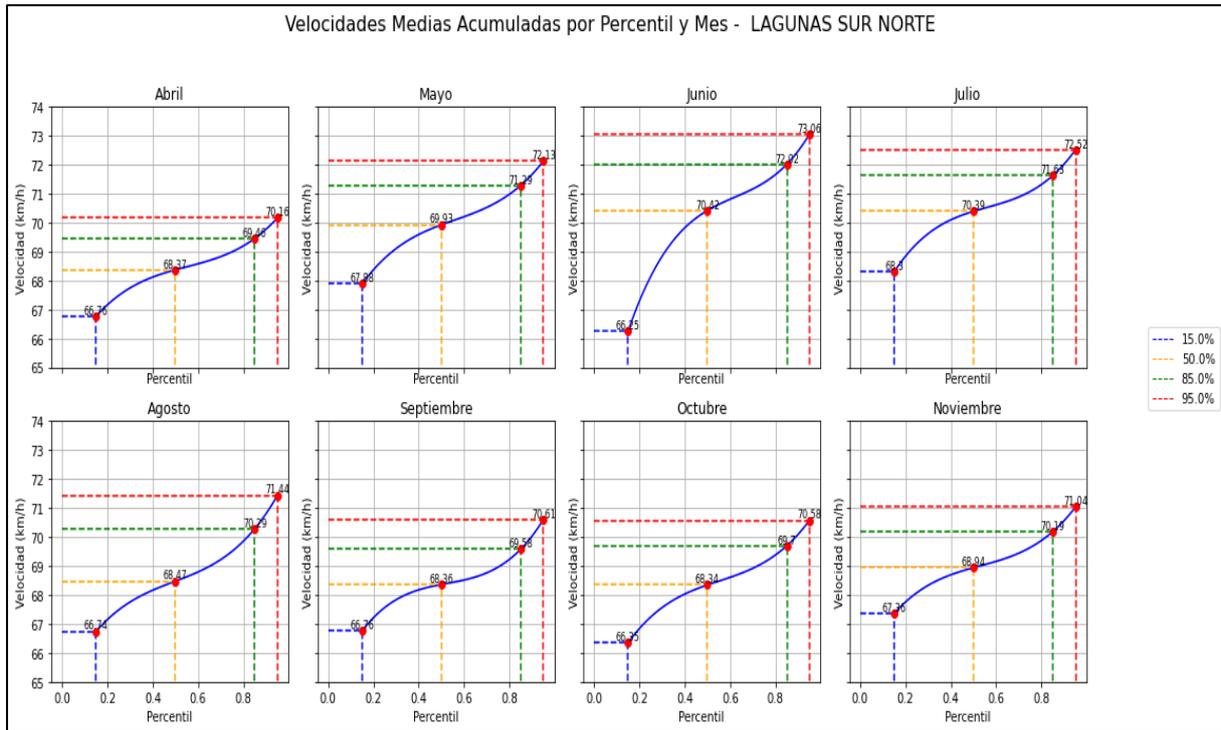


Figura 42

Percentiles de velocidad media acumulada radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte.



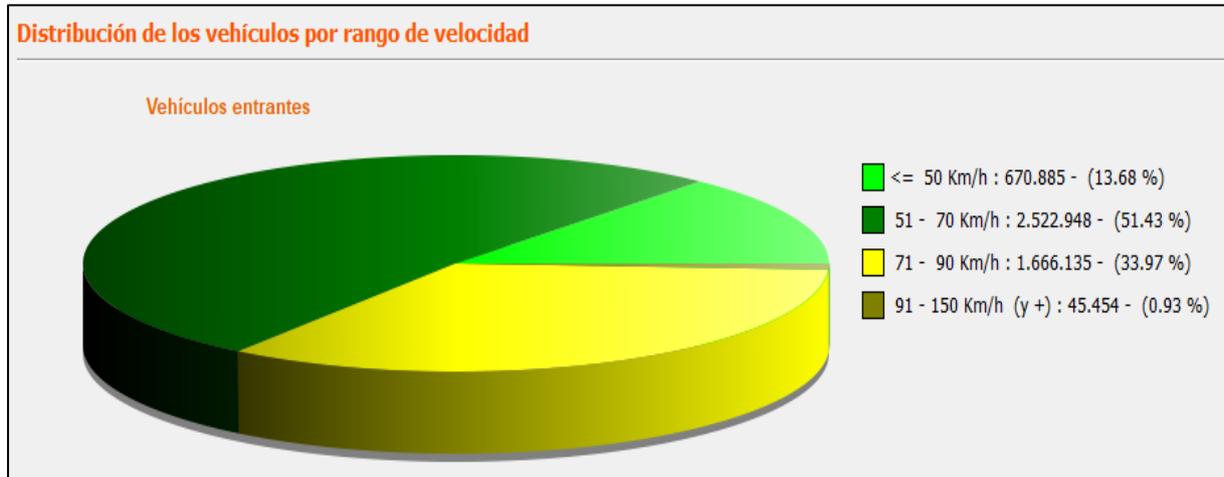
Se puede verificar en la Figura 40 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 4658950 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido sur norte sector Lagunas de Oxidación, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 98.69% (4598028 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 1.31% (60922 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Se evidencia en la Figura 41 que durante junio se alcanzan las velocidades más altas. La velocidad media acumulada en el percentil 85 para este mes, como se muestra en la Figura 42, registrando 72.02 km/h, sobrepasa ligeramente la de los otros meses. Esto implica que durante este período se experimenta una proporción mayor de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido. Estas condiciones sugieren una congestión de tráfico más pronunciada y velocidades promedio más elevadas en comparación con otros meses del año. No obstante, es crucial tener en cuenta que este dato de velocidad es una estimación, ya que se calcula utilizando promedios de velocidades cada 30 minutos en el radar.

### 3.2.1.5. Radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte

**Figura 43**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte.*



**Figura 44**

*Distribución de velocidades medias radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte.*

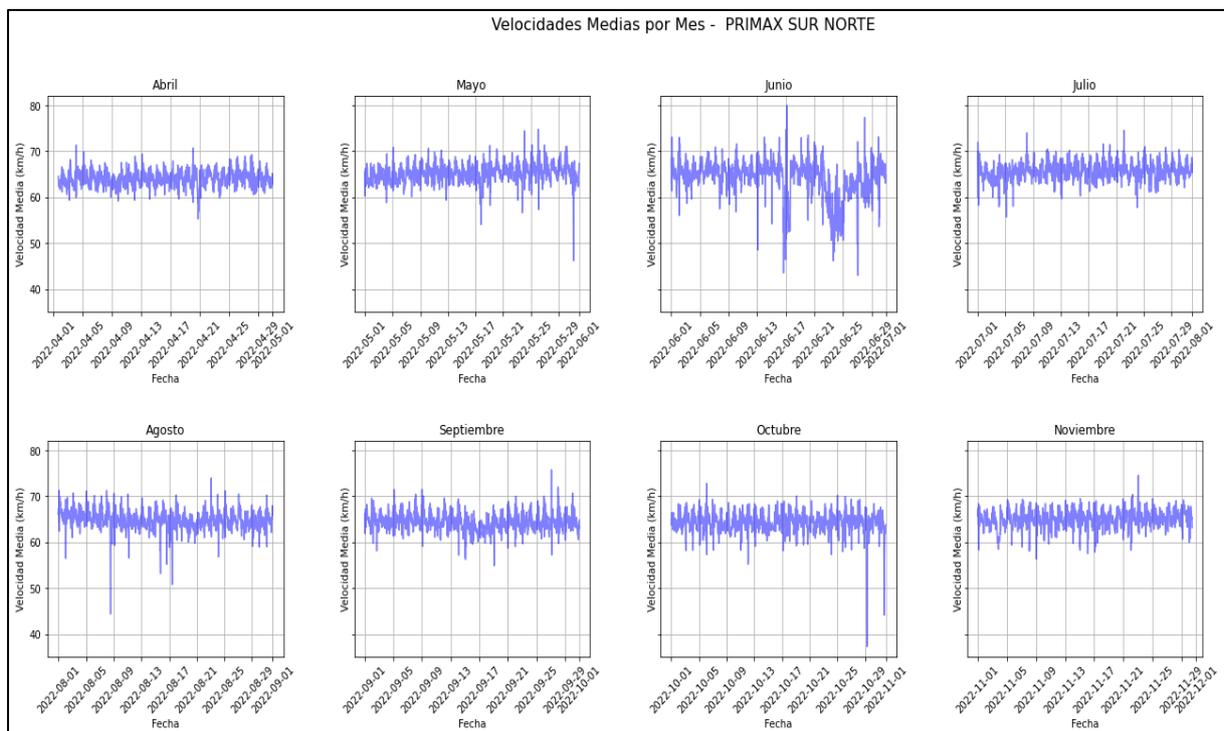
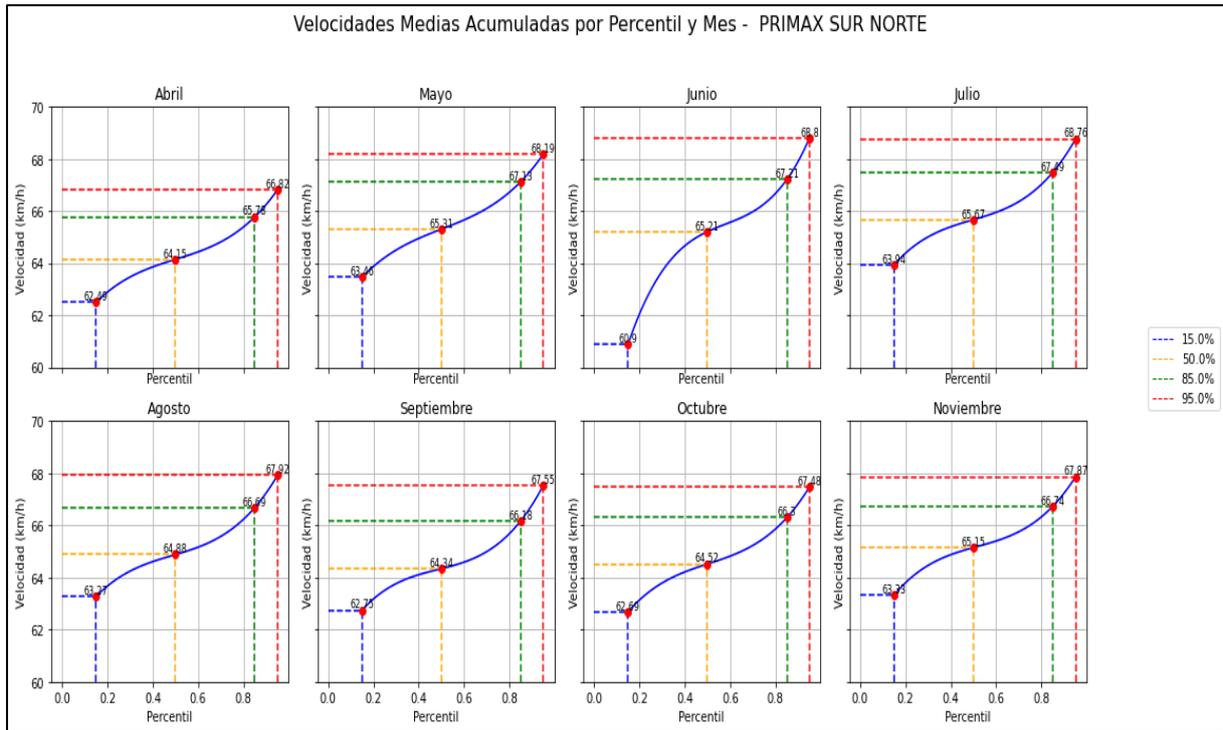


Figura 45

Percentiles de velocidad media acumulada radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte.



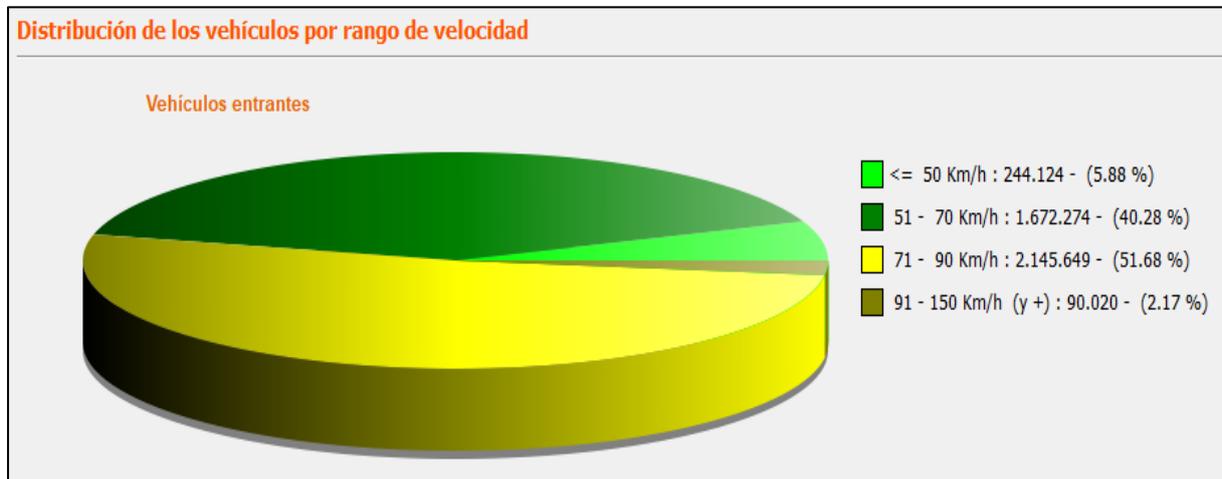
Se puede verificar en la Figura 43 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 4905722 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido sur norte sector Challuabamba, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 99.97% (4860268 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 0.93% (45454 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Es evidente también en la Figura 44 que junio registra las velocidades más altas. La velocidad media acumulada en el percentil 85, alcanzando los 67.21 km/h para este mes, como se muestra en la Figura 45, apenas supera a la de los demás meses, señalando así que durante este período se vive una mayor extensión de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido. Esto indica que en junio se presentan condiciones de tráfico más densas que impulsan mayores velocidades promedio en comparación con otros meses del año. No obstante, es vital tener en mente que esta medida de velocidad es aproximada, ya que se basa en promedios cada 30 minutos registrados en el radar.

### 3.2.1.6. Radar Puerta de Hierro dirección Sur Norte

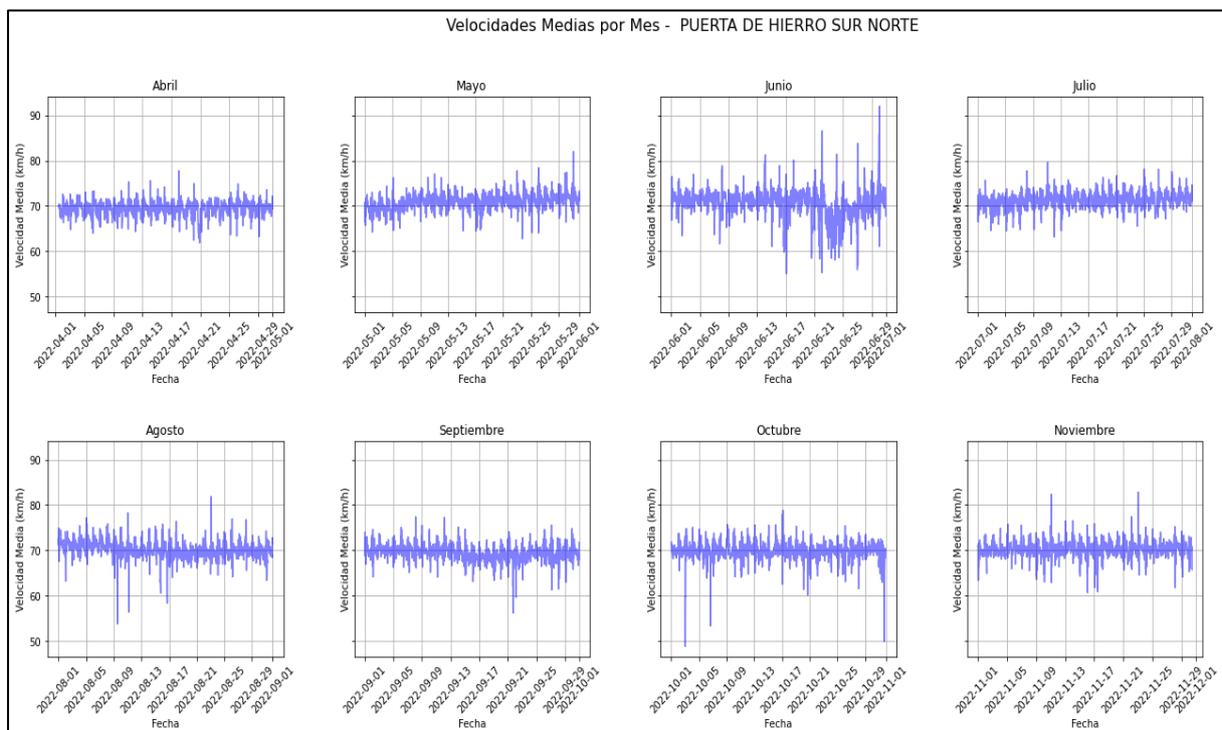
**Figura 46**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte.*



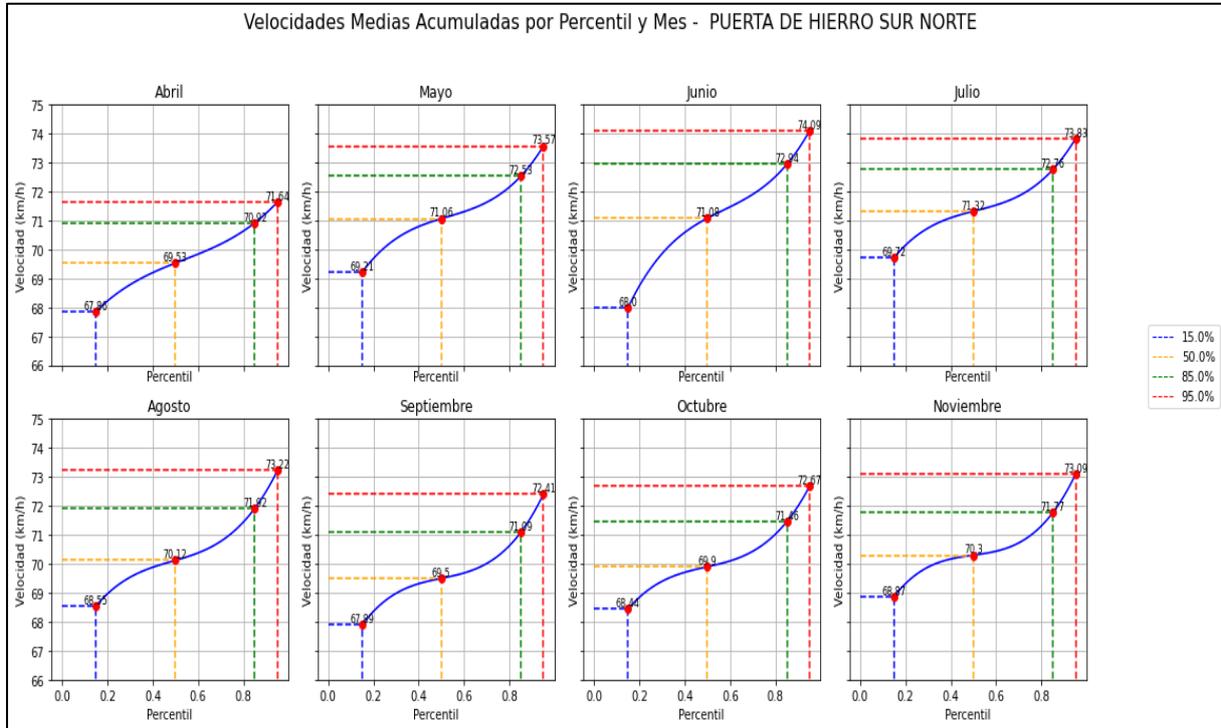
**Figura 47**

*Distribución de velocidades medias radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte.*



**Figura 48**

*Percentiles de velocidad media acumulada radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Sur Norte.*



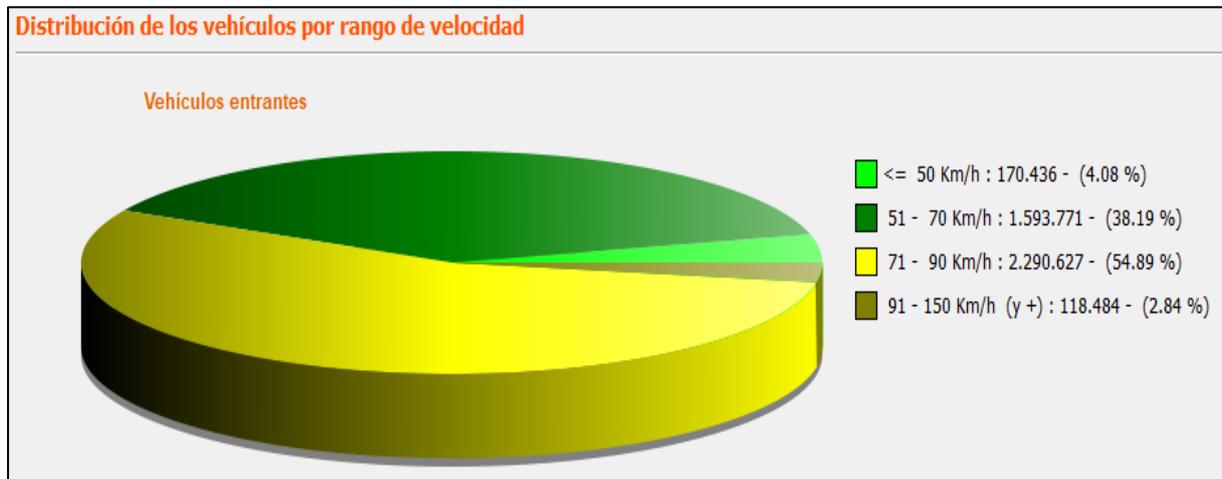
Se puede verificar en la Figura 46 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 4152067 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido sur norte sector Puerta de Hierro, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 97.83% (4062047 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 2.17% (90020 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Así mismo, se observa en la Figura 47 que junio se caracteriza por exhibir las velocidades más altas. La velocidad media acumulada en el percentil 85, alcanzando los 72.94 km/h para este mes, como se muestra en la Figura 48, apenas supera ligeramente a la de los otros meses. Esto sugiere que durante junio se experimenta una mayor proporción de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido. Tales condiciones denotan un tráfico más denso durante este período, lo que conlleva a mayores velocidades promedio acumuladas en comparación con los otros meses del año. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este parámetro de velocidad es una estimación, dado que se calcula utilizando velocidades medias cada 30 minutos registradas en el radar.

### 3.2.1.7. Radar Puerta de Hierro dirección Norte Sur

**Figura 49**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Norte Sur.*



**Figura 50**

*Distribución de velocidades medias radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Norte Sur.*

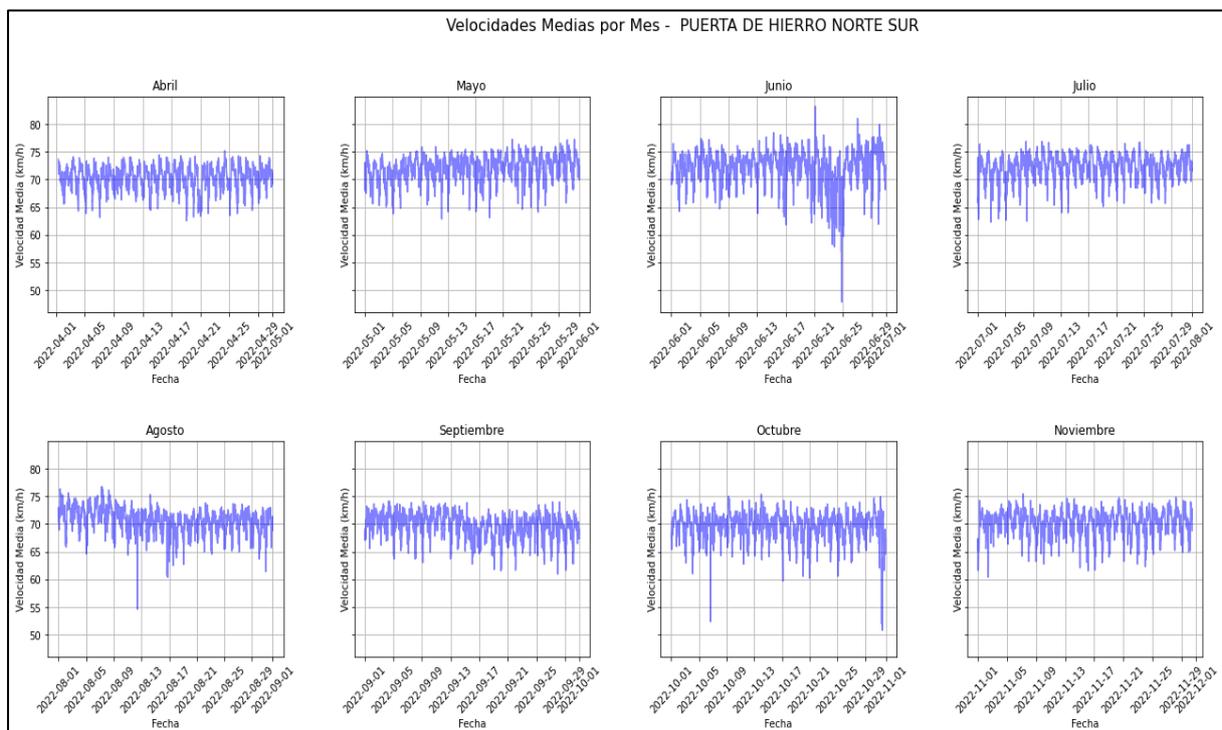
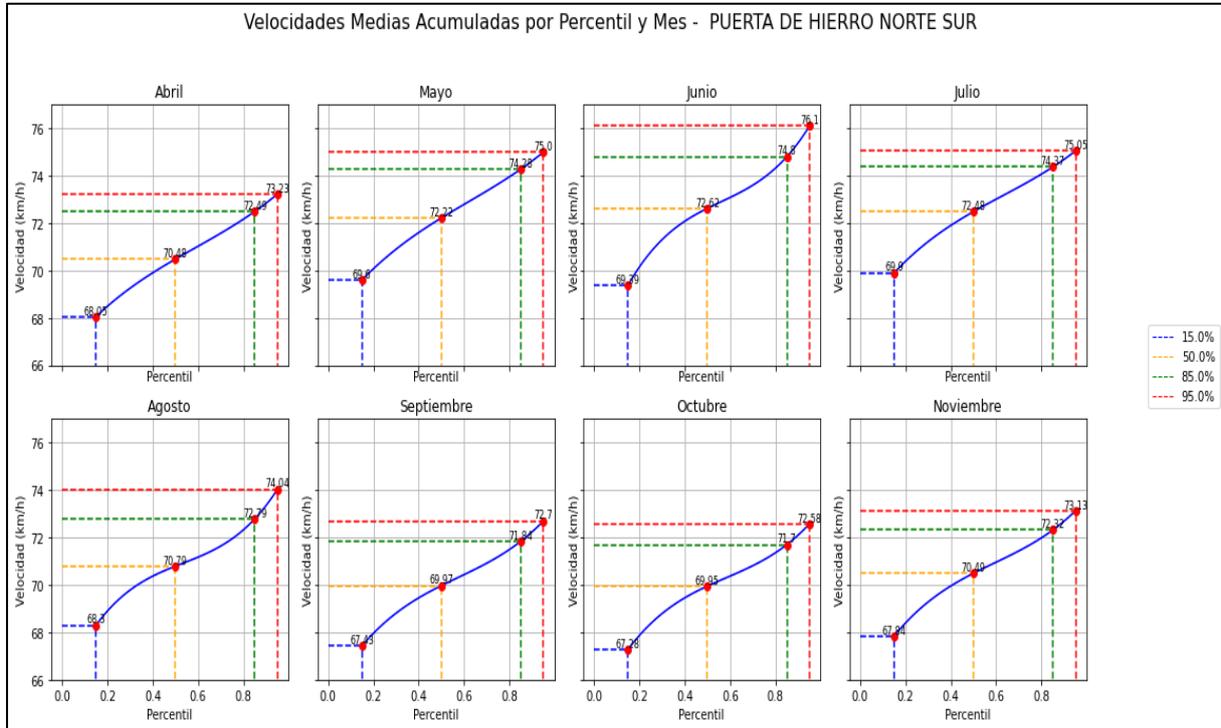


Figura 51

Percentiles de velocidad media acumulada radar Urbanización Puerta de Hierro dirección Norte Sur.



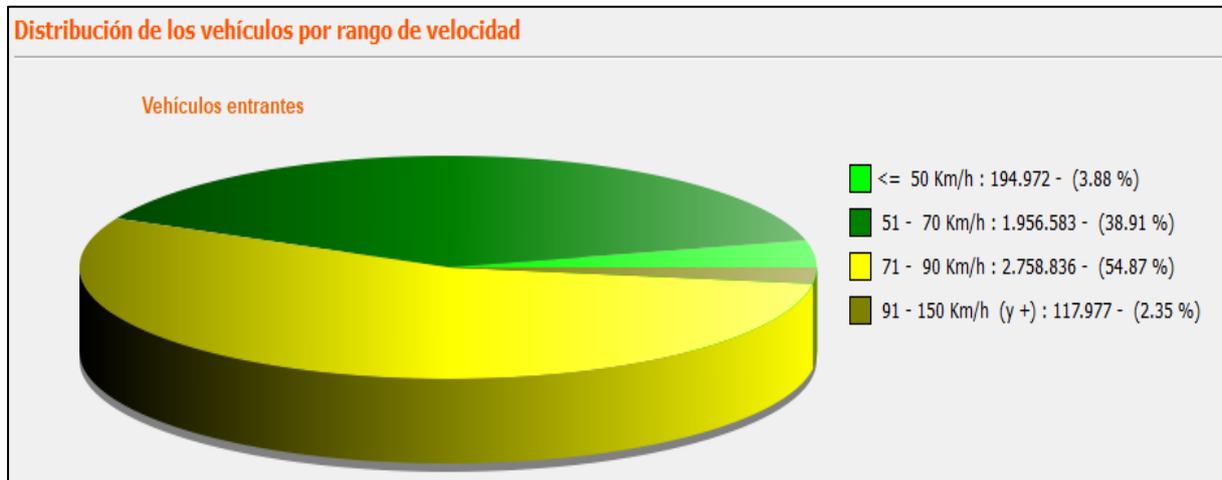
Se puede verificar en la Figura 49 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 4173318 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido norte sur sector Puerta de Hierro, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 97.16% (4054834 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 2.84% (118484 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Así se aprecia también en la Figura 50 que junio presenta las mayores velocidades. La velocidad media acumulada en el percentil 85, de 74.80 km/h para junio, como se muestra en la Figura 51 es ligeramente superior a la de los otros meses, lo que indica una mayor proporción de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido durante este período. Esto sugiere condiciones de tráfico más intensas y velocidades promedio acumuladas más altas en comparación con otros meses del año. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este dato es aproximado debido a la utilización de velocidades medias por cada 30 minutos en el radar.

### 3.2.1.8. Radar Puente de Nulti dirección Norte Sur

**Figura 52**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Puente de Nulti dirección Norte Sur.*



**Figura 53**

*Distribución de velocidades medias radar Puente de Nulti dirección Norte Sur.*

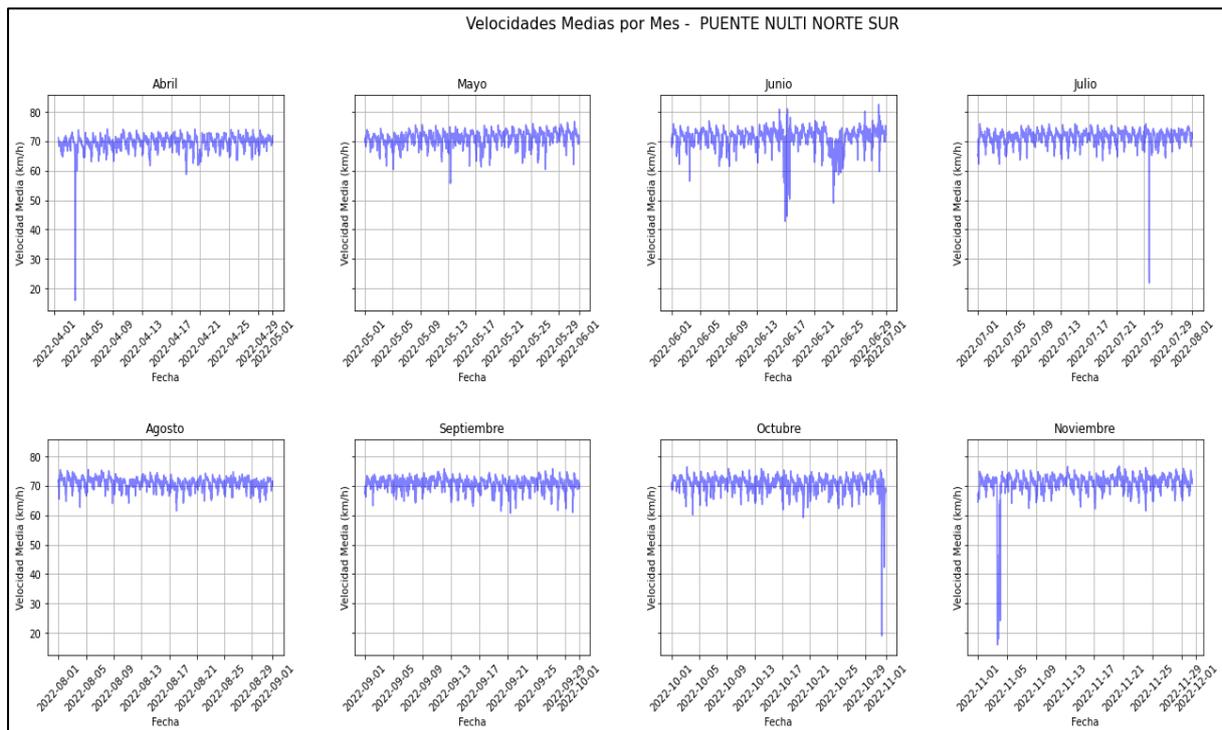
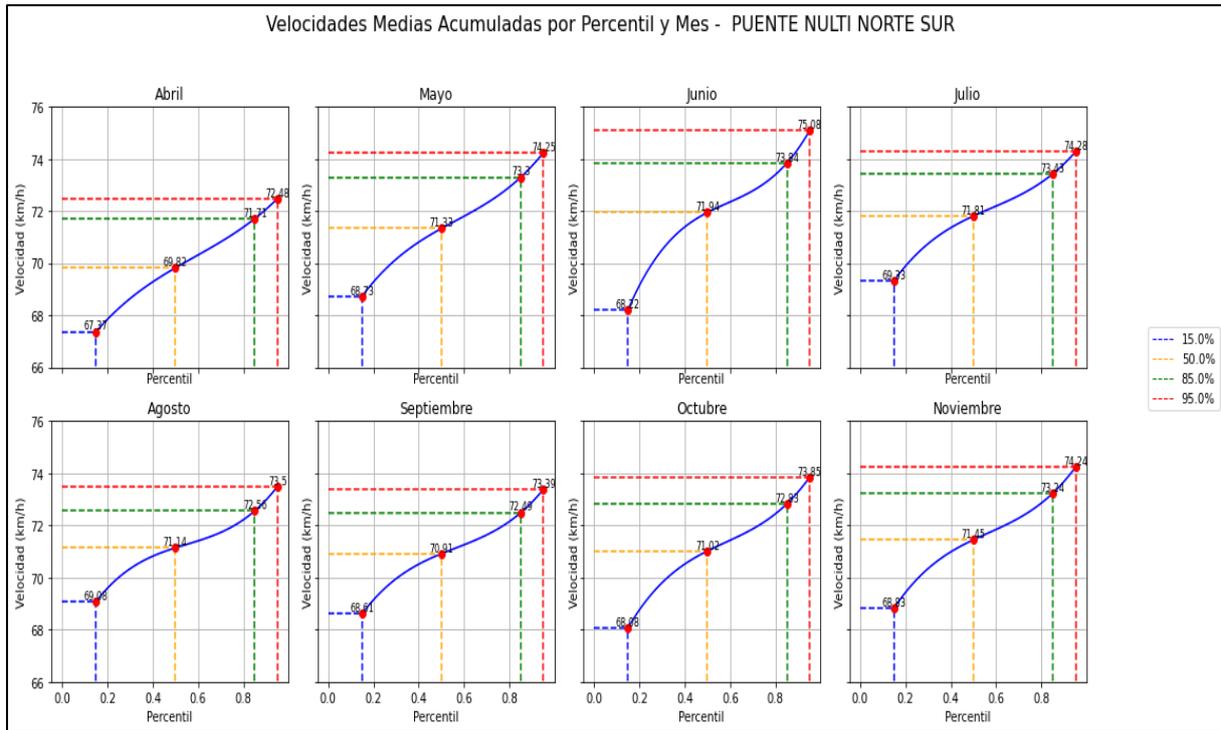


Figura 54

Percentiles de velocidad media acumulada radar Puente de Nulti dirección Norte Sur.



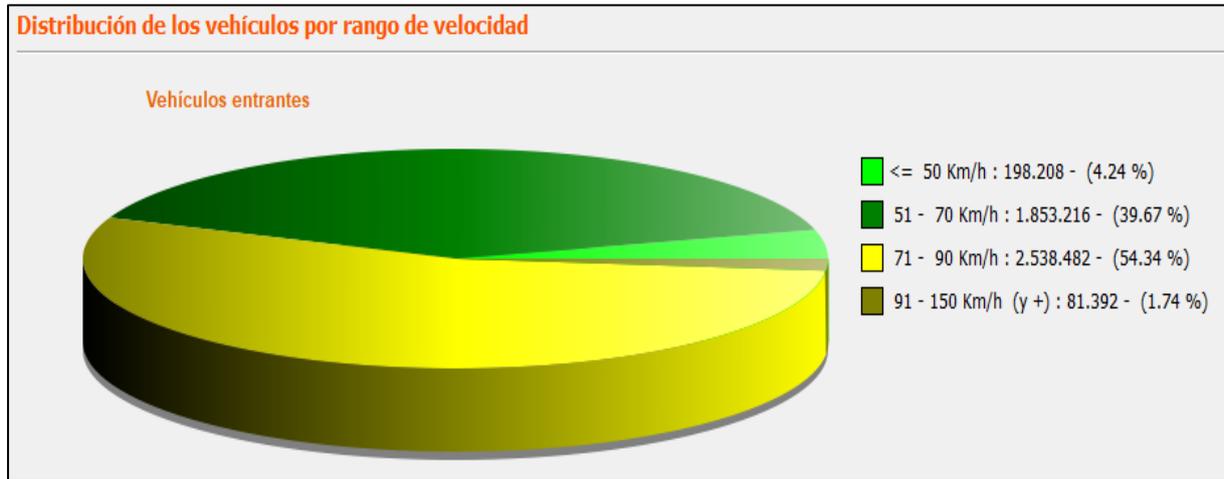
Se puede verificar en la Figura 52 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 5028368 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido norte sur sector Puente de Nulti, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 97.65% (4910391 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 2.35% (117977 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Se puede apreciar también en la Figura 53, que el mes de junio es el que presenta las mayores velocidades. En este caso, la velocidad media acumulada en el percentil 85 de 73.84 km/h para junio, como se muestra en la Figura 54, es ligeramente superior a la de los otros meses, indicando que durante este período se experimenta una mayor proporción de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido, siendo la velocidad límite máxima para este conjunto de datos. Esto sugiere que durante este mes se producen condiciones de tráfico más intensas que generan mayores velocidades promedio acumuladas en comparación con otros meses del año, sin embargo, es un parámetro de velocidad aproximado puesto que se trabaja con velocidades medias por cada 30 minutos en el radar.

### 3.2.1.9. Radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur

**Figura 55**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur.*



**Figura 56**

*Distribución de velocidades medias radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur.*

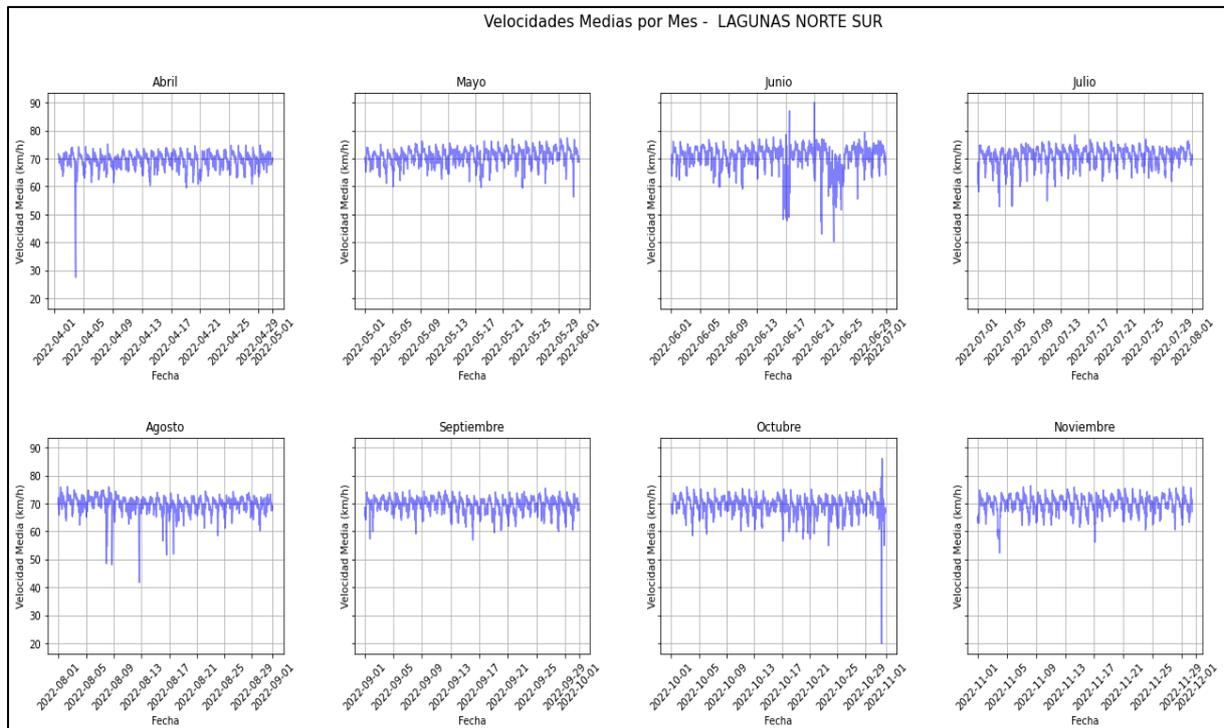
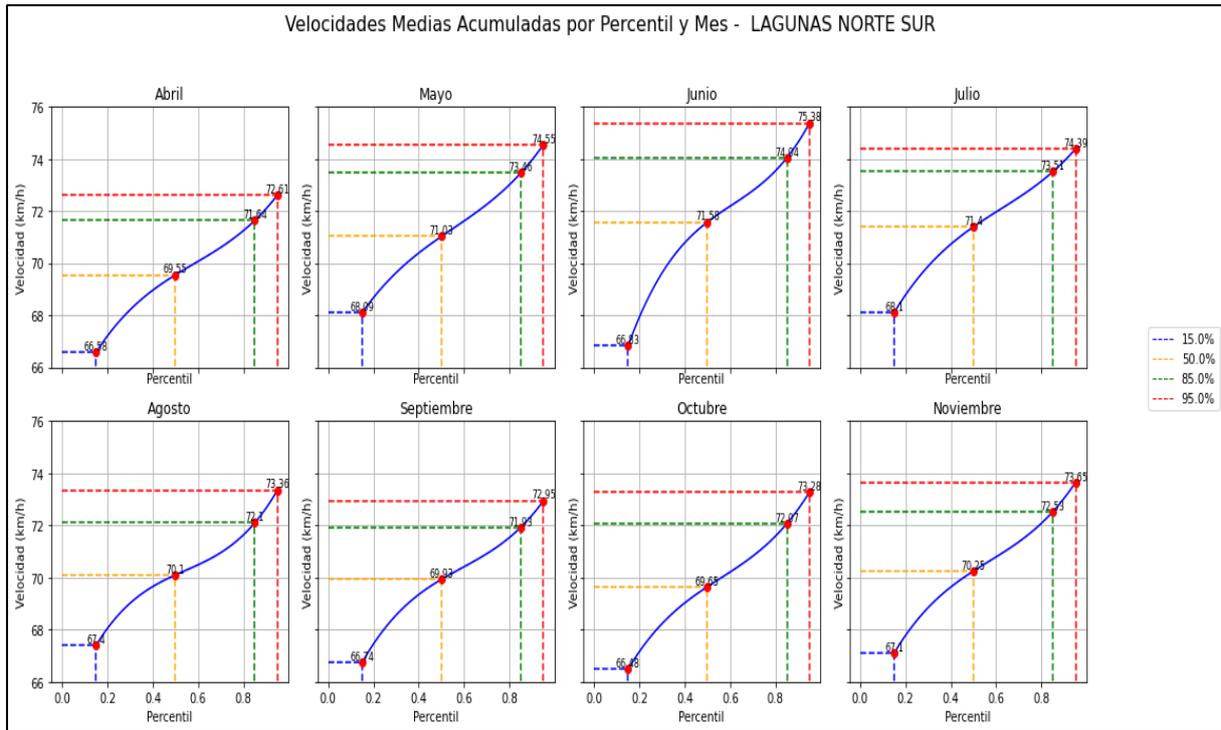


Figura 57

Percentiles de velocidad media acumulada radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur.



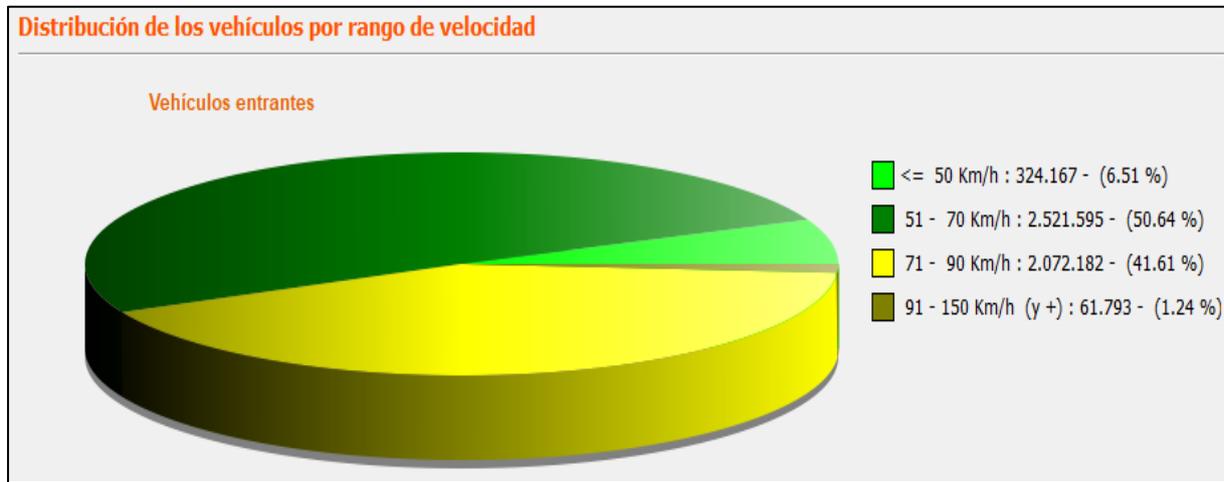
Se puede verificar en la Figura 55 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 4671298 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido norte sur sector Lagunas de Oxidación, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 98.26% (4589906 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 1.74% (81392 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Se puede apreciar también en la Figura 56, que el mes de junio es el que presenta las mayores velocidades. En este caso, la velocidad media acumulada en el percentil 85 de 74.04 km/h para junio, como se muestra en la Figura 57 es ligeramente superior a la de los otros meses, indicando que durante este período se experimenta una mayor proporción de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido, siendo la velocidad límite máxima para este conjunto de datos. Esto sugiere que durante este mes se producen condiciones de tráfico más intensas que generan mayores velocidades promedio acumuladas en comparación con otros meses del año, sin embargo, es un parámetro de velocidad aproximado puesto que se trabaja con velocidades medias por cada 30 minutos en el radar.

### 3.2.1.10. Radar Amaru dirección Norte Sur

**Figura 58**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Amaru dirección Norte Sur.*



**Figura 59**

*Distribución de velocidades medias radar Amaru dirección Norte Sur.*

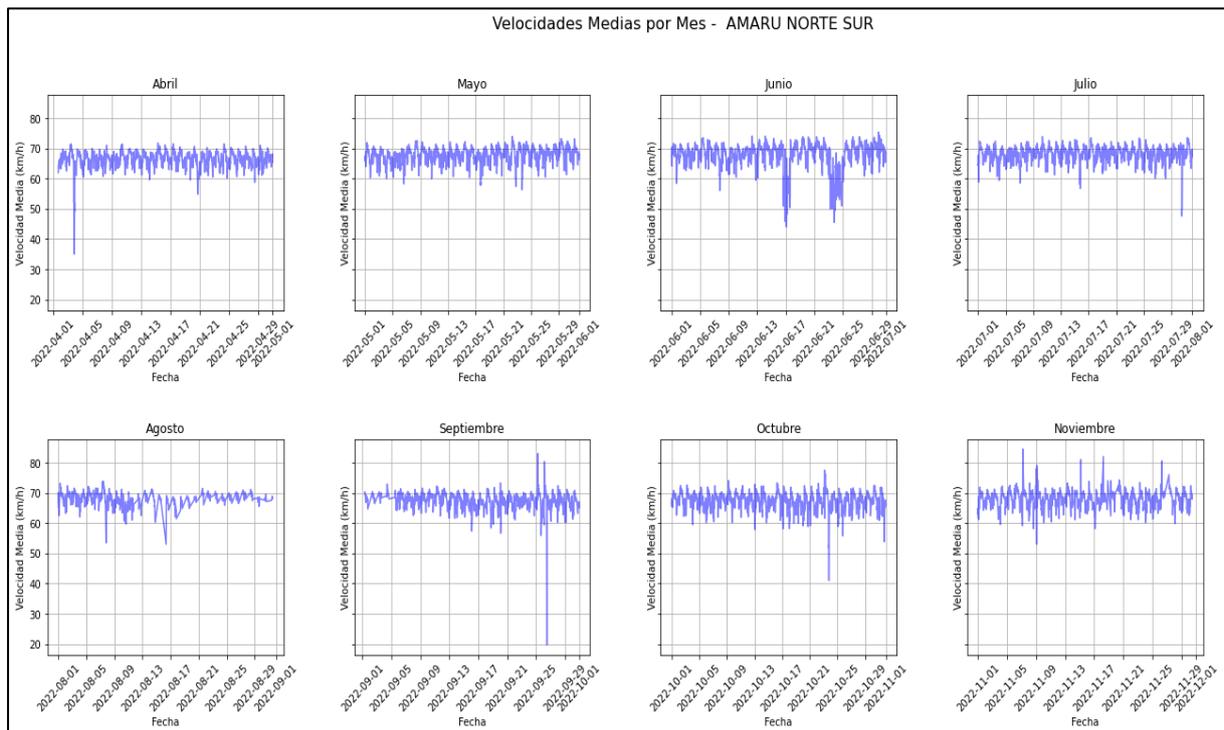
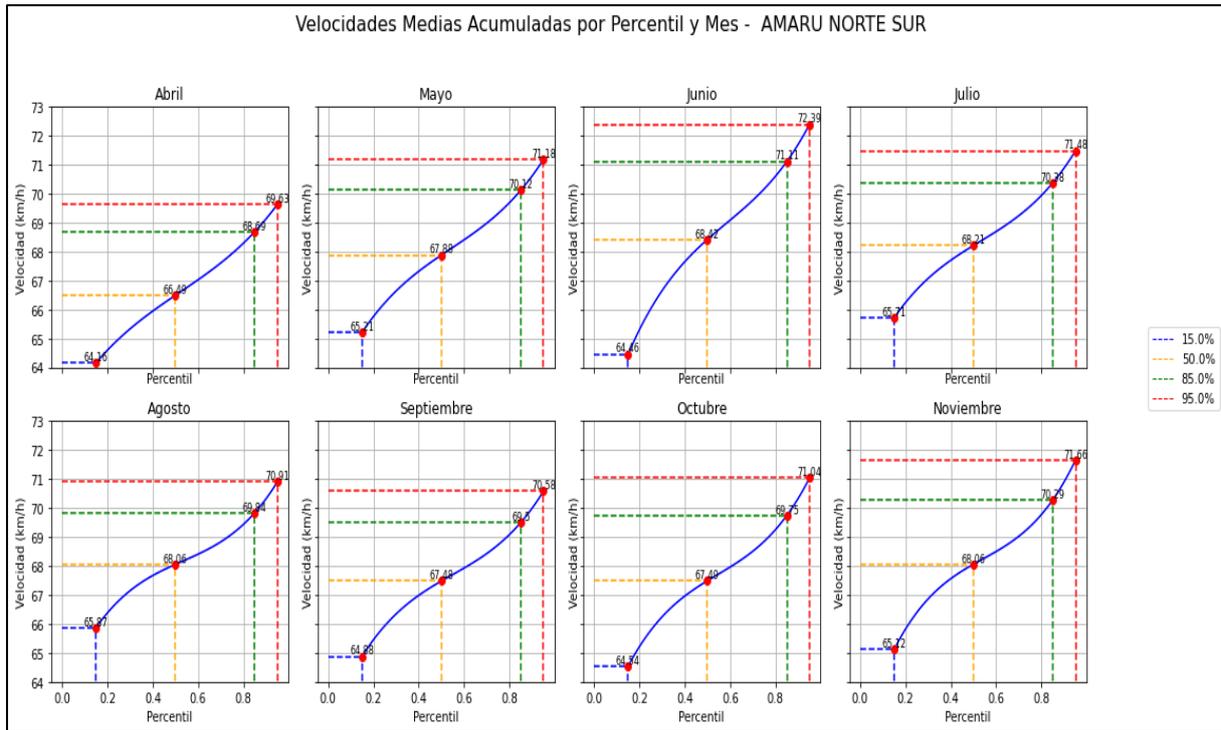


Figura 60

Percentiles de velocidad media acumulada radar Amaru dirección Norte Sur.



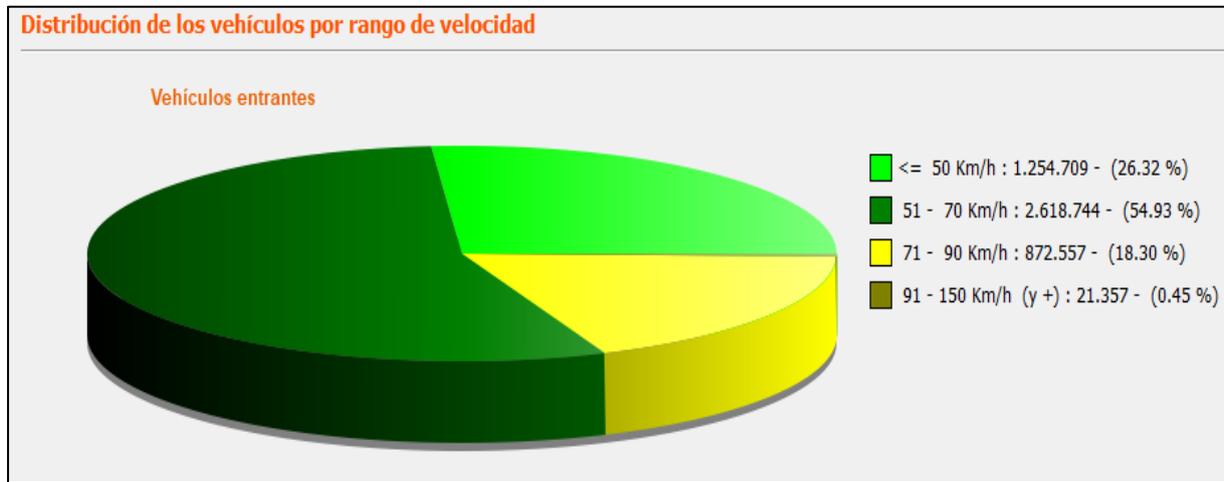
Se puede verificar en la Figura 58 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 4979737 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido norte sur sector Amaru, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 98.76% (4917944 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 1.24% (61793 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Se puede apreciar también en la Figura 59, que el mes de junio es el que presenta las mayores velocidades. En este caso, la velocidad media acumulada en el percentil 85 de 71.11 km/h para junio, como se muestra en la Figura 60, es ligeramente superior a la de los otros meses, indicando que durante este período se experimenta una mayor proporción de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido, siendo la velocidad límite máxima para este conjunto de datos. Esto sugiere que durante este mes se producen condiciones de tráfico más intensas que generan mayores velocidades promedio acumuladas en comparación con otros meses del año, sin embargo, es un parámetro de velocidad aproximado puesto que se trabaja con velocidades medias por cada 30 minutos en el radar.

### 3.2.1.11. Radar Vista Linda dirección Norte Sur

**Figura 61**

*Distribución de vehículos por rango de velocidad radar Vista Linda dirección Norte Sur.*



**Figura 62**

*Distribución de velocidades medias radar Vista Linda dirección Norte Sur.*

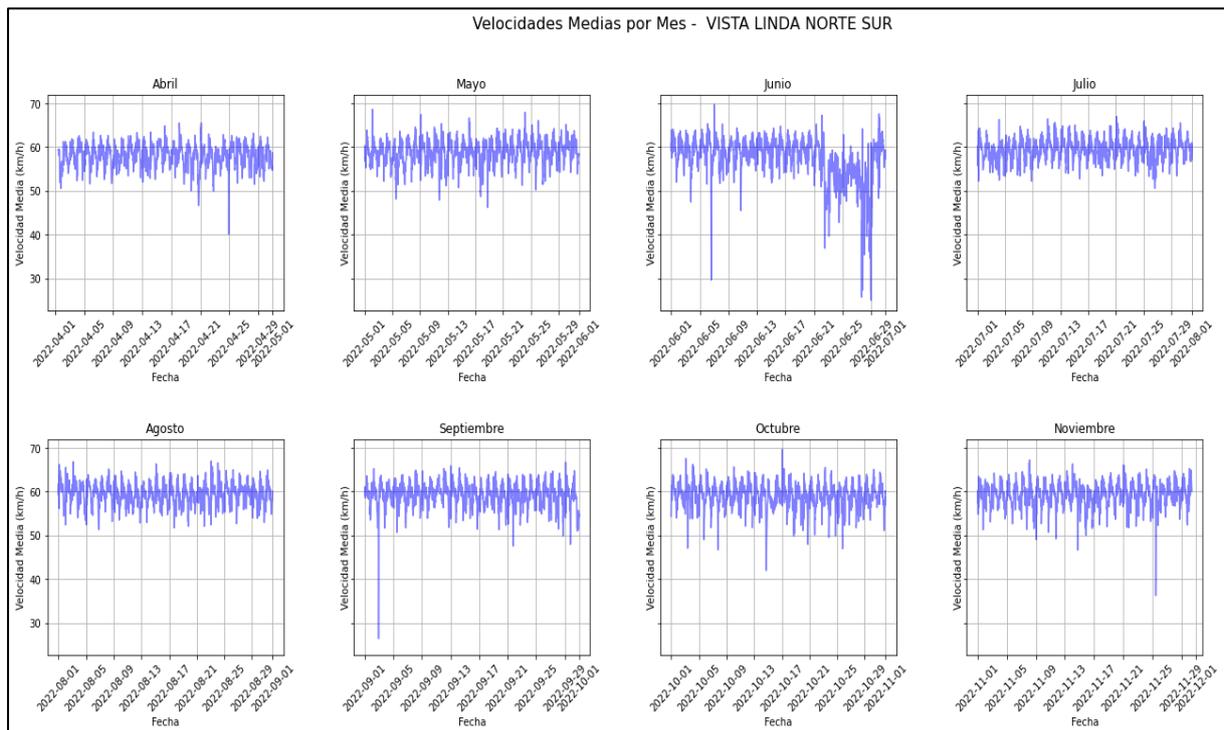
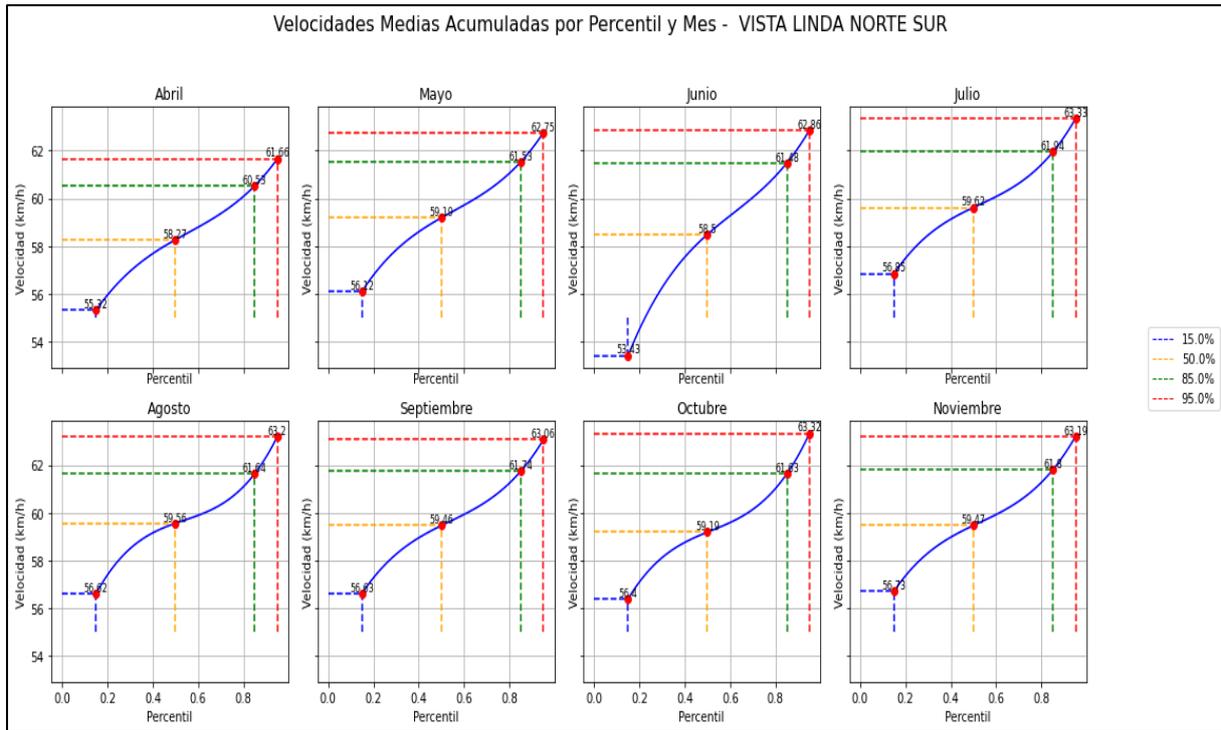


Figura 63

Percentiles de velocidad media acumulada radar Vista Linda dirección Norte Sur.



Se puede verificar en la Figura 61 que durante el periodo abril-noviembre del año 2022, se registra un total de 4767367 vehículos que circulan por la autopista Cuenca-Azogues sentido norte sur sector Vista Linda, según el rango de velocidades máximas registradas se puede observar que el 99.55% (4746010 vehículos) respeta los límites de velocidad, mientras que el 0.45% (21357 vehículos) de los vehículos no respetan los límites de velocidad permitidos.

Se puede apreciar también en la Figura 62, que el mes de julio es el que presenta las mayores velocidades. En este caso, la velocidad media acumulada en el percentil 85 de 61.94 km/h para julio, como se muestra en la Figura 63, es ligeramente superior a la de los otros meses, indicando que durante este período se experimenta una mayor proporción de tiempo con velocidades acumuladas por encima del límite máximo establecido, siendo la velocidad límite máxima para este conjunto de datos. Esto sugiere que durante este mes se producen condiciones de tráfico más intensas que generan mayores velocidades promedio acumuladas en comparación con otros meses del año, sin embargo, es un parámetro de velocidad aproximado puesto que se trabaja con velocidades medias por cada 30 minutos en el radar.

3.2.2. Resumen General de Velocidades

Tabla 3

Resumen de análisis de velocidades en todos los radares.

Dirección	Radar	Mes con Velocidad Mayor	Vel. límite máxima (km/h)	Núm. total de vehículo que circulan	Núm. de vehículos que circulan a diario	Núm. de vehículos que no respetan los límites de velocidad	% de vehículos que no respetan los límites de velocidad
Sur Norte	Vista Linda	Noviembre	70.94	4619802	16799	32249	0.74
	Max Uhle	Junio	72.08	5220495	18984	107568	2.06
	Amaru	Junio	67.33	5164127	18779	53645	1.04
	Lagunas de Oxidación	Junio	72.02	4658950	16942	60922	1.31
	Primax Challuabamba	Junio	67.21	4905722	17839	45454	0.93
	Urbanización Puerta de Hierro	Junio	72.94	4152067	15098	90020	2.17
Norte Sur	Urbanización Puerta de Hierro	Junio	74.80	4173318	15176	118484	2.84
	Puente de Nulti	Junio	73.84	5028368	18285	117977	2.35
	Lagunas de Oxidación	Junio	74.04	4671298	16987	81392	1.74
	Amaru	Junio	71.01	4979737	18108	61793	1.24
	Vista Linda	Julio	61.94	4767367	17336	21357	0.45

Nota. Datos tomados de los análisis anteriores.

Identificando los sectores con mayor velocidad registrada en cada dirección, se destaca la importancia de esa ubicación específica en términos de cumplimiento de límites de velocidad, pues sirve como punto focal para la aplicación de medidas de control y vigilancia. Entonces, en base a los cálculos realizados y en función de los resultados indicados en la Tabla 3, se tiene que, en la dirección Sur Norte, el radar ubicado en la Urbanización Puerta de Hierro registró la velocidad límite máxima de 72.94 km/h (cálculo realizado con velocidades medias), además de contar con el mayor porcentaje de vehículos que infringen la velocidad de

circulación permitida con 2.84%. De igual manera, se realiza el análisis para la dirección Norte Sur, donde el radar ubicado en la Urbanización Puerta de Hierro registró la velocidad límite máxima de 74.80 km/h (cálculo realizado con velocidades medias), también cuenta con el mayor número de vehículos (118484) que no respetan el límite de velocidad establecido con un porcentaje del 2.84% del total de vehículos que circularon por el radar, además de ser esta la zona con mayor velocidad límite y números de vehículos que sobrepasan el límite de velocidad permitido en las dos direcciones. En contraste con el radar ubicado en el sector Vista Linda dirección norte sur, que presenta el menor número de vehículos (21357) que incumplen la normativa de tránsito, infiriendo que este bajo porcentaje de 0.45% del total de vehículos, se puede deber a las condiciones viales debido a la pendiente considerable, lo cual provoca la disminución de velocidad en el sector.

La dirección Norte Sur presenta un mayor incumplimiento de los límites de velocidad permitidos, lo que puede atribuirse al comportamiento de los usuarios, en este caso al ser esta dirección de entrada a la ciudad de Cuenca, lo que obliga a las personas a incrementar la velocidad de circulación debido a factores laborales y educativos para cumplir un horario determinado. Por otra parte, en la dirección Sur Norte, la velocidad de circulación disminuye, lo que puede deberse al retorno a los hogares sin ninguna prisa después de sus respectivas jornadas. Al observar los patrones mensuales de velocidad, es posible determinar periodos específicos en los que se registra una mayor velocidad en comparación con los diferentes sectores en donde se encuentran los radares de detección de velocidad. Mediante este análisis temporal se obtiene información valiosa sobre las tendencias mensuales del comportamiento de los conductores, es así que se observa una tendencia general de mayor velocidad registrada durante el mes de junio en ambas direcciones (5 de 6 radares en la dirección sur norte y 4 de 5 radares en la dirección norte sur), lo que sugiere una mayor vigilancia y aplicación de medidas de control durante este mes en específico.

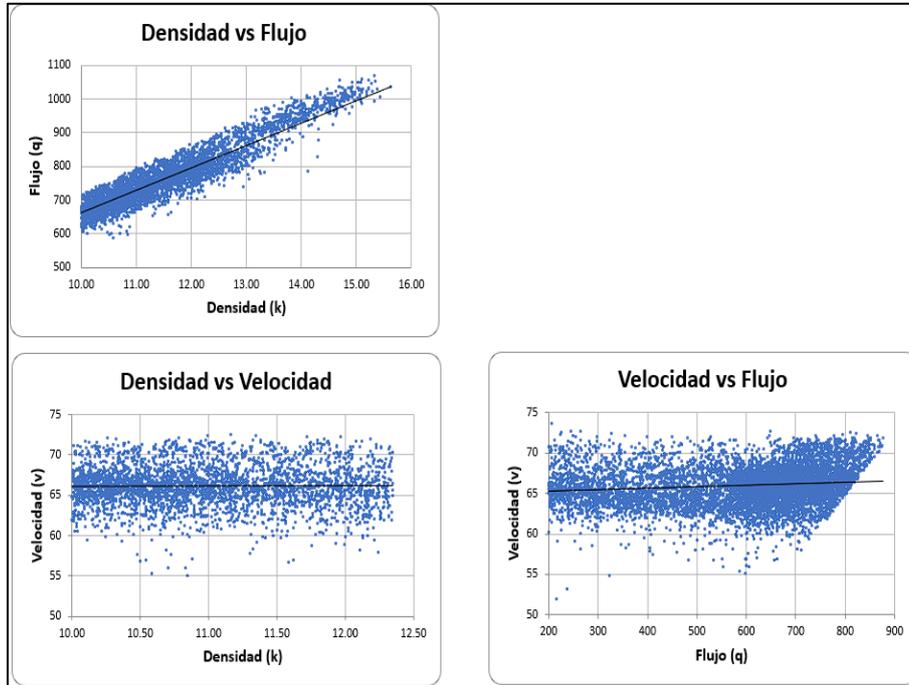
### **3.3. Modelos Básicos del Flujo Vehicular Teorema de Greenshields**

Para el modelo lineal del flujo vehicular se necesita el cálculo de la densidad de la autopista. En el caso de análisis se trabaja con la densidad promedio para toda la vía o sección en cuestión, debido que no se cuentan con los datos por separado para cada carril de la autopista. De esta forma se utiliza los todos los vehículos que atraviesan la sección de vía, sin distinción alguna de carril. Para el cálculo de la densidad, se utiliza el flujo total (número total de vehículos que atraviesa la sección de vía) y la velocidad media (velocidad promedio de todos los vehículos en el mismo tramo de análisis).

### 3.3.1. Radar Vista Linda dirección Sur Norte

**Figura 64**

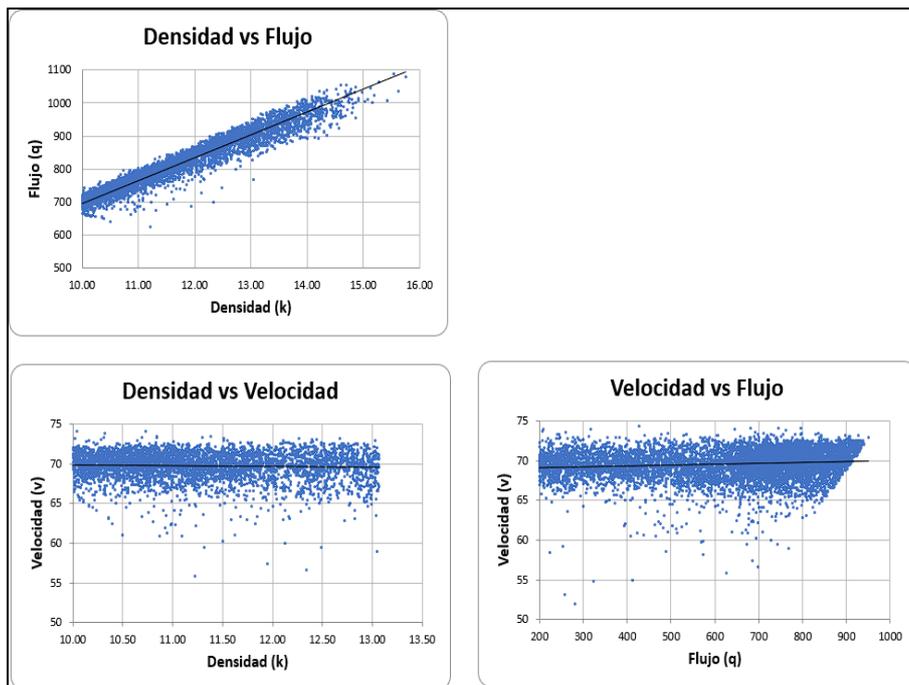
*Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Vista Linda dirección Sur Norte.*



### 3.3.2. Radar Max Uhle dirección Sur Norte

**Figura 65**

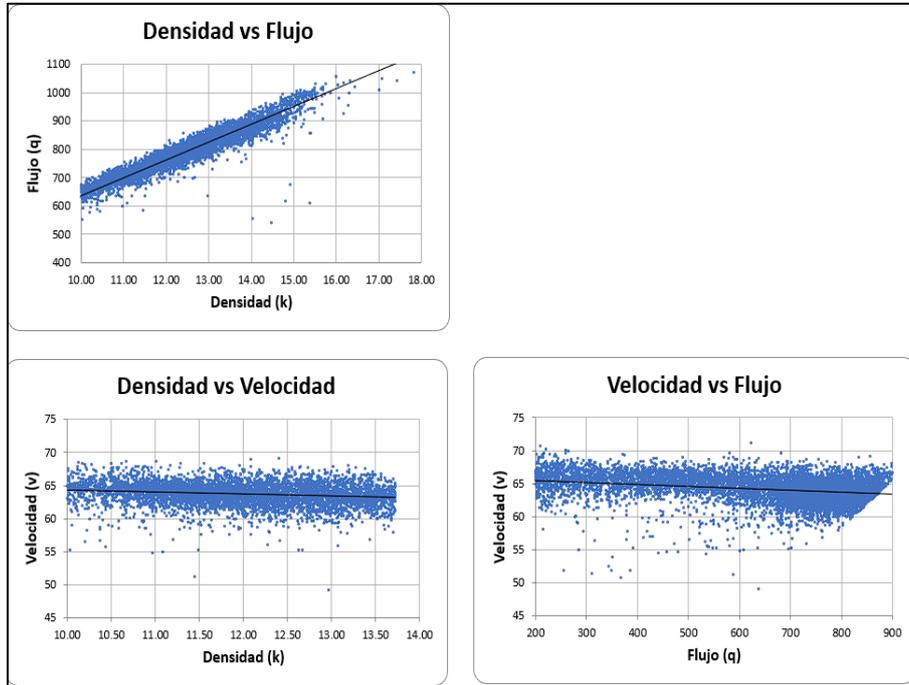
*Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Max Uhle dirección Sur Norte.*



3.3.3. Radar Amaru dirección Sur Norte

Figura 66

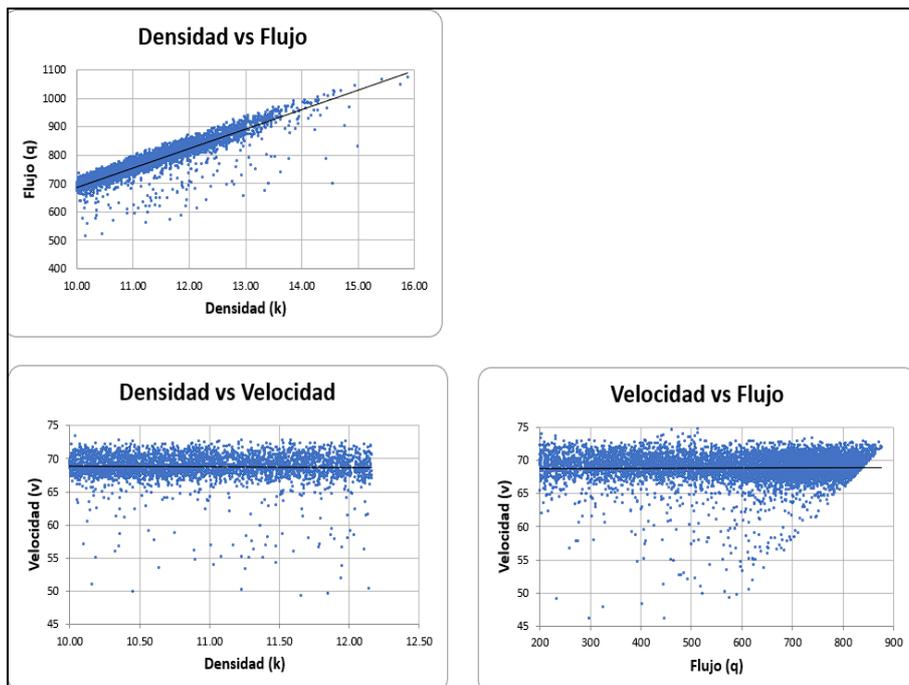
Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Amaru dirección Sur Norte.



3.3.4. Radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte

Figura 67

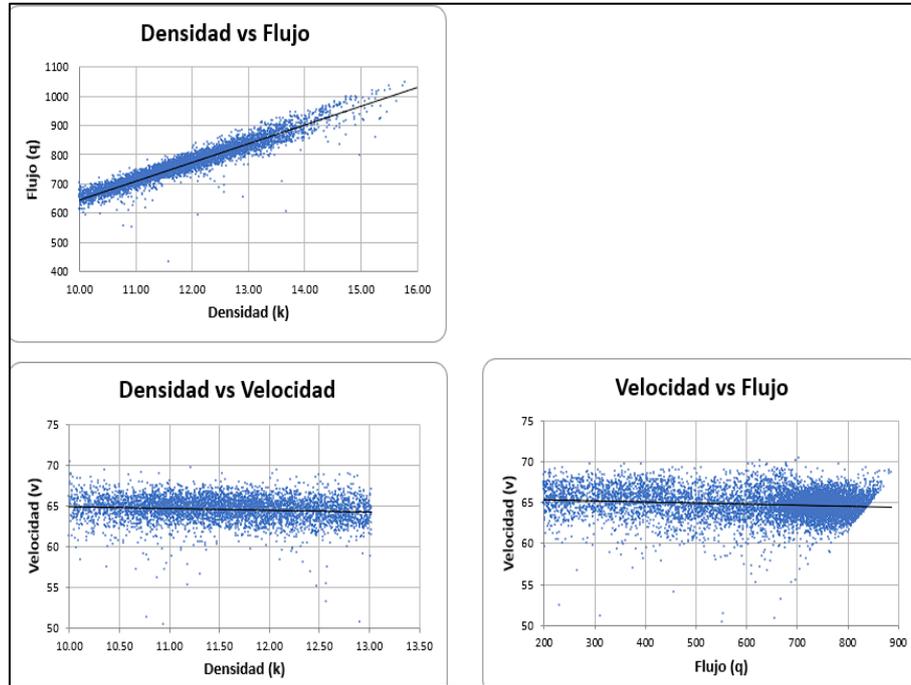
Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Lagunas de Oxidación dirección Sur Norte.



### 3.3.5. Radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte

**Figura 68**

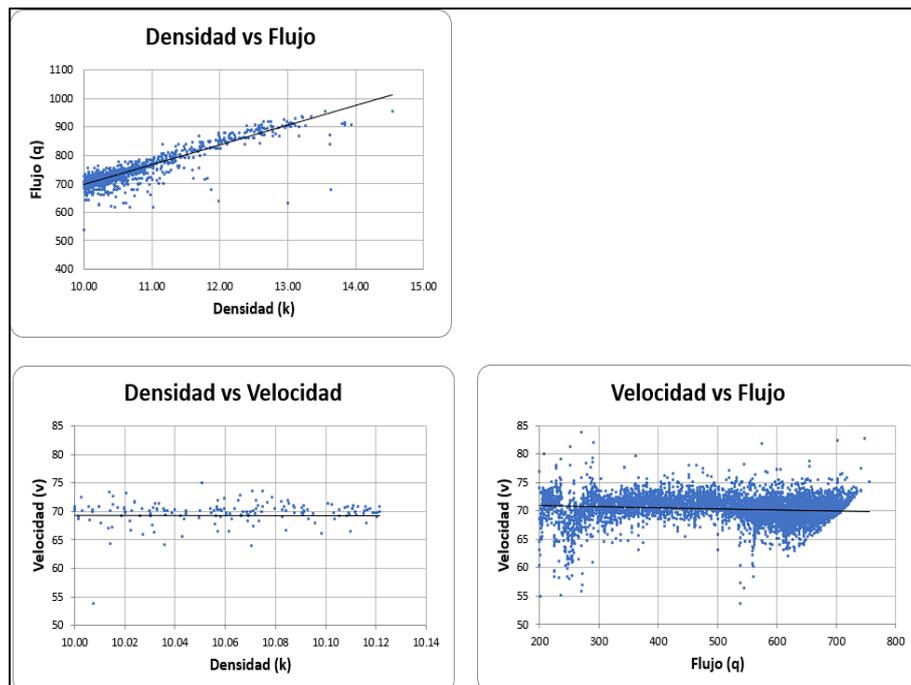
*Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Primax Challuabamba dirección Sur Norte.*



### 3.3.6. Radar Puerta de Hierro dirección Sur Norte

**Figura 69**

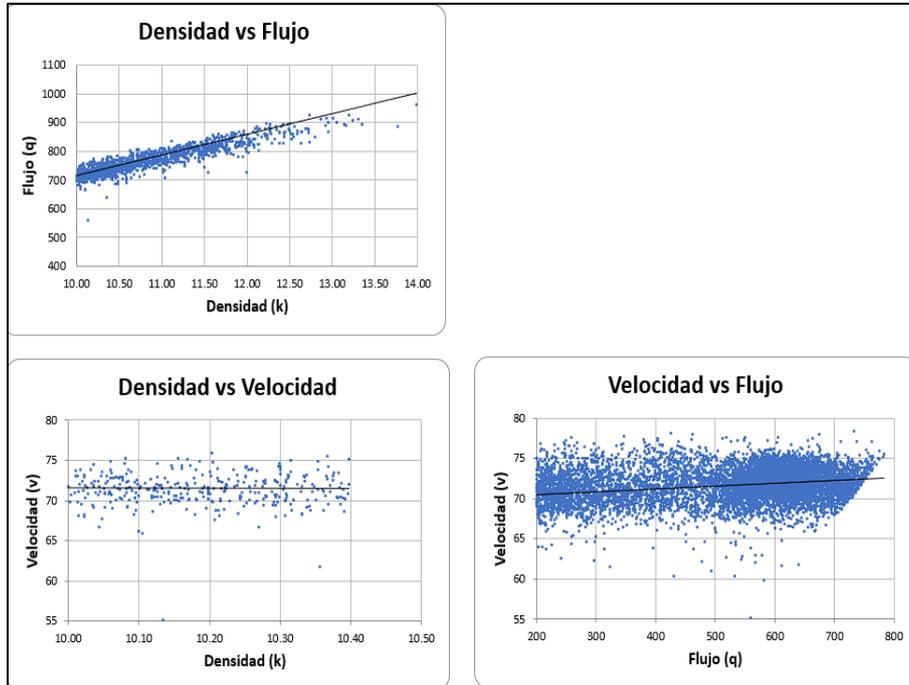
*Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Puerta de Hierro dirección Sur Norte.*



3.3.7. Radar Puerta de Hierro dirección Norte Sur

Figura 70

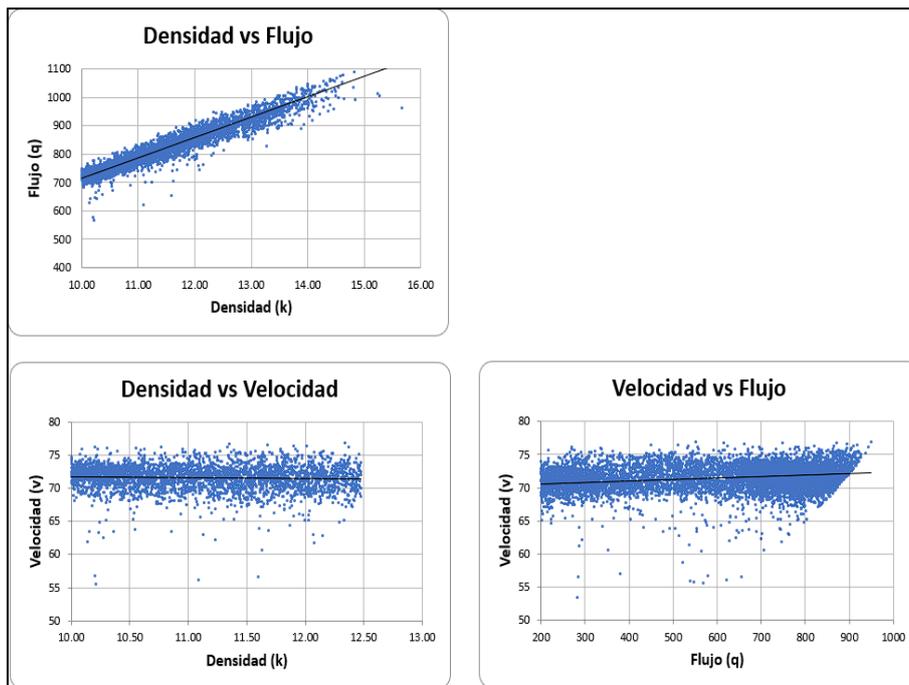
Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Puerta de Hierro dirección Norte Sur.



3.3.8. Radar Puente de Nulti dirección Norte Sur

Figura 71

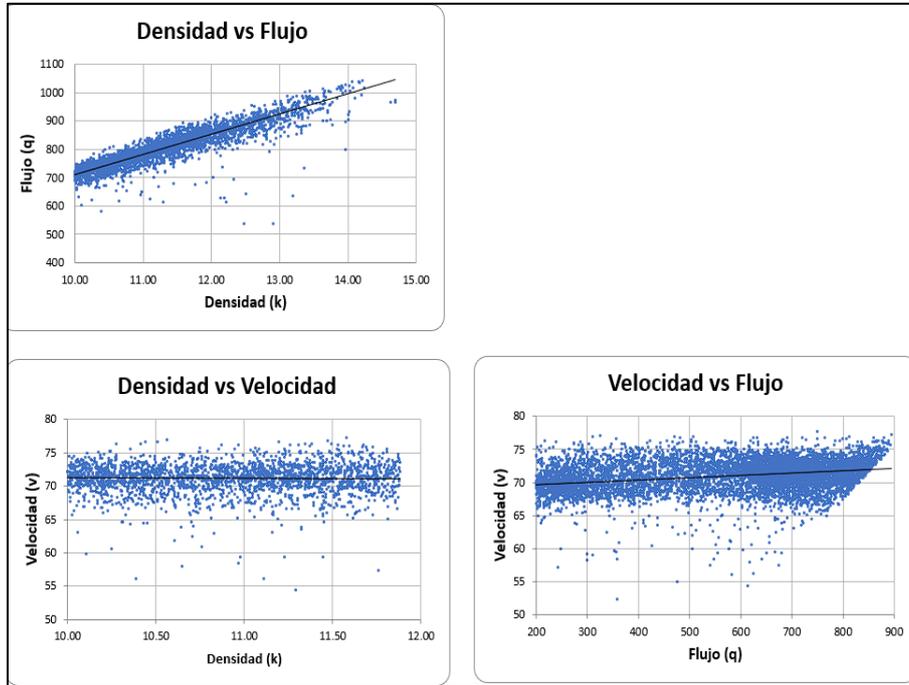
Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Puente de Nulti dirección Norte Sur.



3.3.9. Radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur

Figura 72

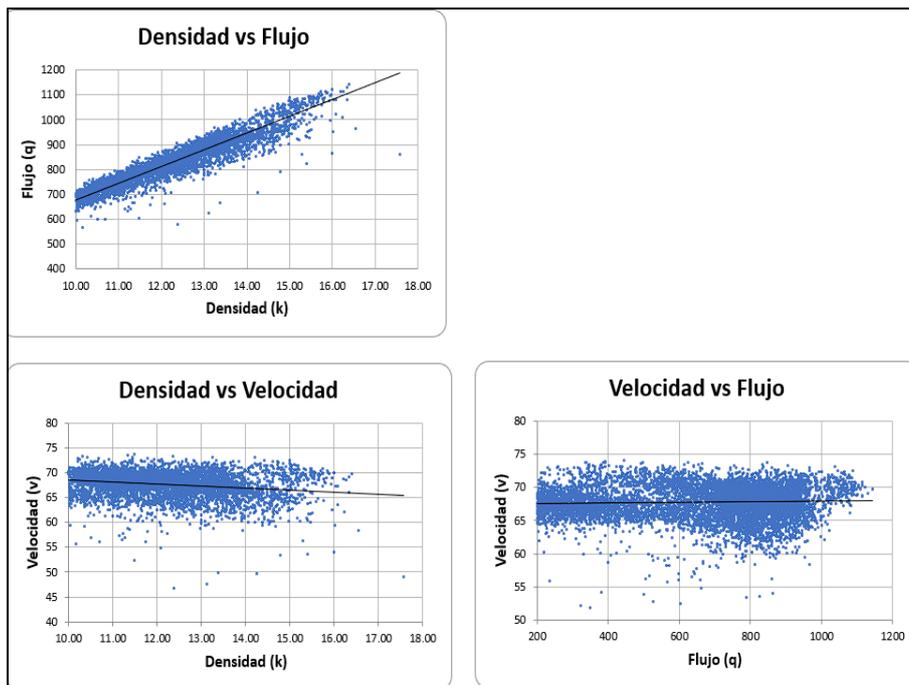
Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Lagunas de Oxidación dirección Norte Sur.



3.3.10. Radar Amaru dirección Norte Sur

Figura 73

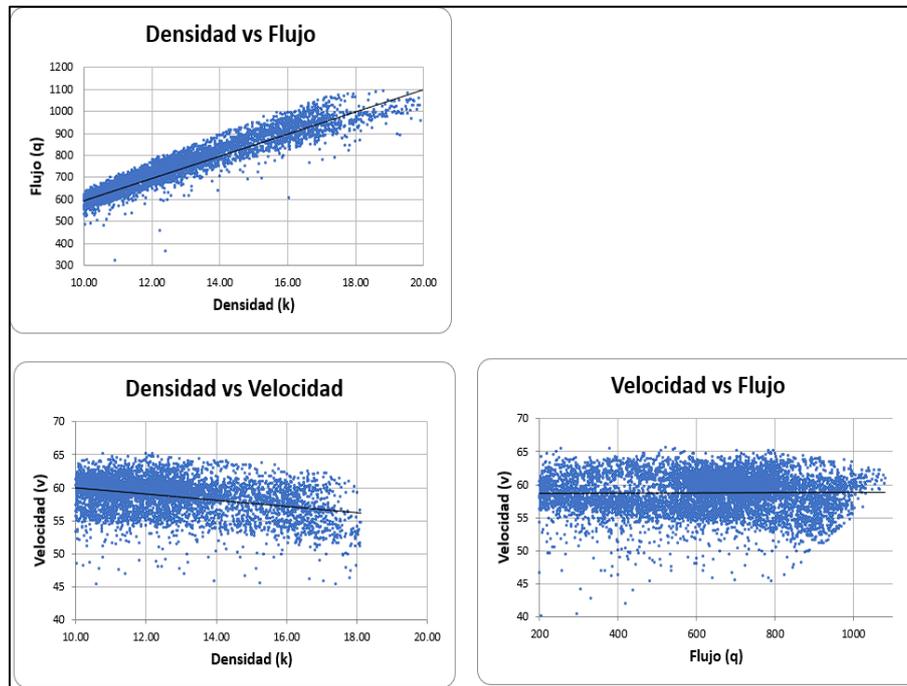
Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Amaru dirección Norte Sur.



### 3.3.11. Radar Vista Linda dirección Norte Sur

**Figura 74**

*Diagrama del flujo básico vehicular en el radar Vista Linda dirección Norte Sur.*



Como se muestra desde la Figura 64 hasta la Figura 74, los diagramas fundamentales del flujo básico vehicular presentan un comportamiento similar para cada uno de los diferentes radares, con lo que se puede realizar un análisis en conjunto de estos. Cuando la pendiente de la recta en los diagramas de densidad y velocidad presenta una relación inversa, a medida que aumenta la densidad del tráfico, la velocidad media tiende a aumentar. Esta relación es poco común en las situaciones de tráfico típicas en carreteras, donde por lo general se espera que la velocidad disminuya a medida que aumenta la densidad debido a la congestión. Sin embargo, puede ocurrir en ciertos casos, como en tramos de carreteras con condiciones óptimas de flujo de tráfico, donde un aumento en la densidad se puede encontrar asociado con una mejor eficiencia del flujo y por ende una velocidad promedio mayor.

La densidad de tráfico en la que se considera que existe congestión puede variar de acuerdo con el contexto y las condiciones específicas, en este caso para la autopista Cuenca-Azogues. Sin embargo, la congestión, generalmente, comienza a ocurrir cuando la densidad de tráfico alcanza un nivel donde los vehículos se encuentran demasiado cerca uno del otro, afectando negativamente la fluidez del tráfico y disminuyendo la velocidad media de manera significativa.

En términos de densidad, este punto de congestión suele estar en un rango de densidades alta, alrededor de 160 y 200 vehículos por kilómetro. Por otro lado, este umbral puede variar de acuerdo con los factores como la velocidad límite, presencia de acceso, salidas, curvas, pendientes y otros elementos, afectando la capacidad de la carretera para manejo del flujo vehicular. Considerando una congestión significativa cuando supera los 160 vehículos por kilómetro de carril para una velocidad límite de 90 km/h en la autopista de estudio.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que solo es una referencia general y que puede variar, comenzando así la congestión incluso antes, dependiendo de condiciones climáticas, condiciones de la carretera, comportamiento del conductor y presencia de puntos de congestión recurrentes. Además, las gráficas presentes en el diagrama fundamental del flujo vehicular no se grafican en su totalidad como se muestra en la Figura 3, debido a que no se llega a niveles de congestión significativos para generar toda la curva, en densidad vs velocidad y velocidad vs flujo. También se debe tener en cuenta que estos valores son aproximados, debido a que se trabaja con velocidad promedio y no las reales para cada vehículo, lo cual sería lo óptimo, pero debido a la disponibilidad de datos se realizó el análisis de manera macroscópica.

### **3.4. Confiabilidad del tiempo de viaje**

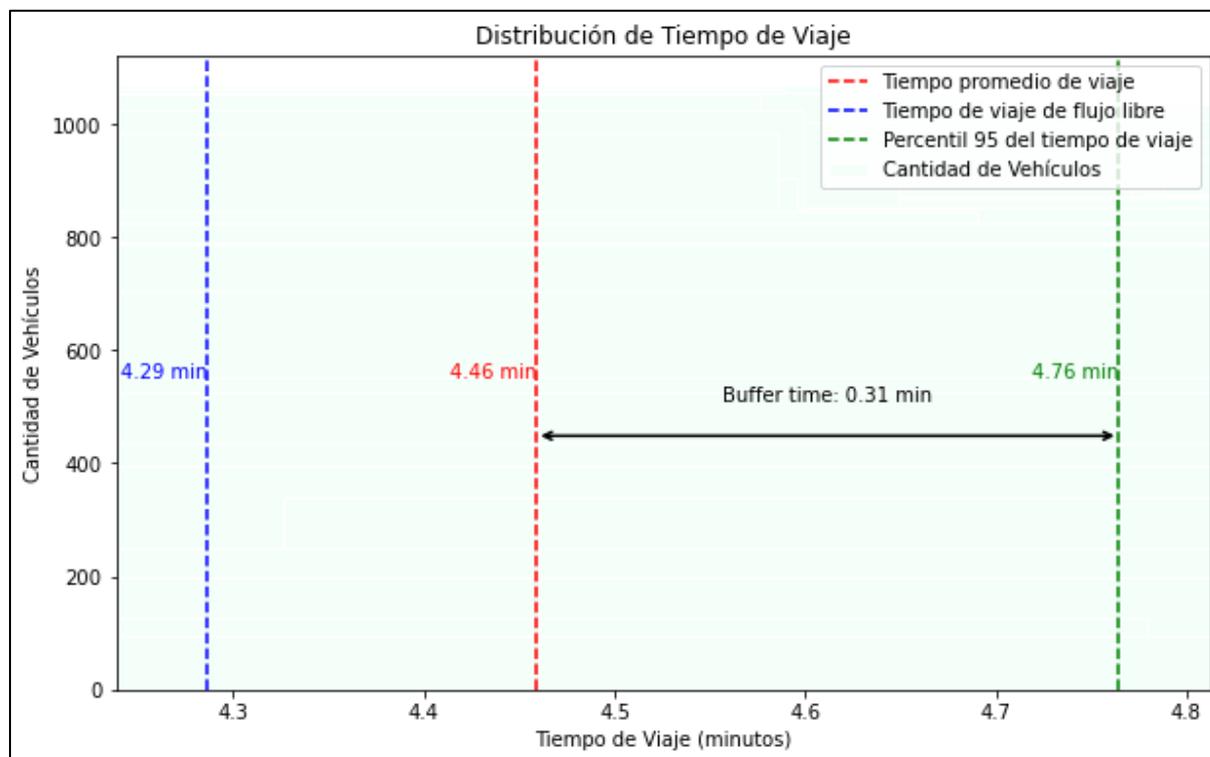
La confiabilidad del tiempo de viaje se relaciona con diversos factores como el índice de tiempo de viaje (TTI), índice de colchón de tiempo o buffer time index (BTI). Dichos factores se encuentran relacionados con el nivel de operación de cada conductor, con lo que pueden incrementar o disminuir los tiempos, debido a que los mismos son aproximados debido a los datos proporcionados de velocidades medias para cada radar.

#### **3.4.1. Dirección Sur Norte**

### 3.4.1.1. Desde Radar Vista Linda a Radar Max Uhle

**Figura 75**

*Distribución de tiempo de viaje en el primer sector de estudio sentido Sur Norte.*

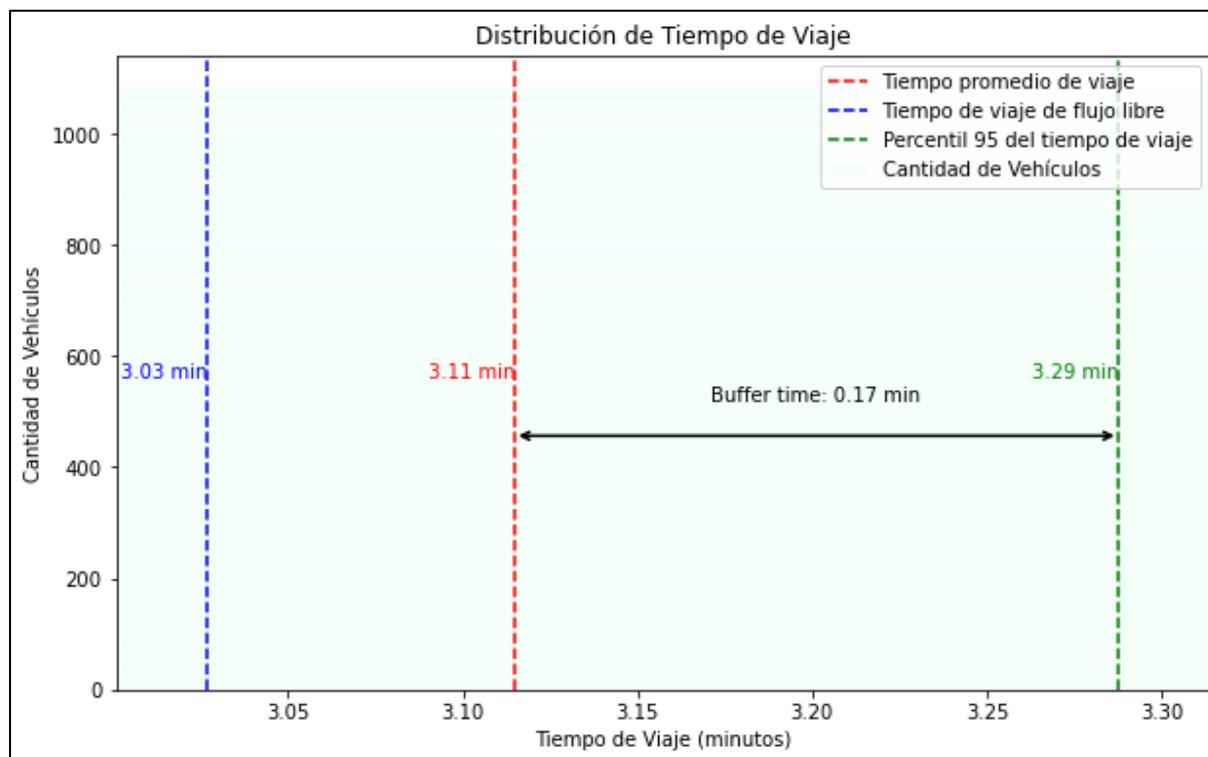


Como se muestra en la Figura 75, el tiempo de viaje correspondiente al percentil 85 de velocidad es de 4.29 minutos, lo que representa la demora normal de un vehículo si existiera flujo libre o cuando se desplaza a máxima velocidad. Mientras que el tiempo promedio de viaje en el tramo seleccionado es de 4.46 minutos correspondiente al percentil 50 de velocidad y el tiempo de viaje cuando la carretera se encuentra congestionada es de 4.76 minutos, lo cual corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje. De esta forma se cuenta con un buffer time o colchón de tiempo de 0.31 minutos, que sería el tiempo que se puede llegar a demorar en trasladarse de un lugar a otro debido a ciertas demoras, entre las cuales se encuentra, congestiónamiento por festividades, cuellos de botella, accidentes, etc. Las congestiones observadas pueden atribuirse a diversos factores, entre ellos, la presencia de puntos de interés y accesos importantes a lo largo de la autopista Cuenca-Azogues. Específicamente, la proximidad al ingreso a la parroquia de Turi, reconocida como un destino turístico, contribuye al congestiónamiento en este tramo. Además, la presencia del redondel de Gapal y la salida hacia la parroquia El Valle también influyen en la congestión, especialmente durante las horas pico de inicio y finalización de la jornada laboral, lo que puede ocasionar retrasos en el flujo vehicular.

### 3.4.1.2. Desde Radar Max Uhle a Radar Amaru

Figura 76

Distribución de tiempo de viaje en el segundo sector de estudio sentido Sur Norte.

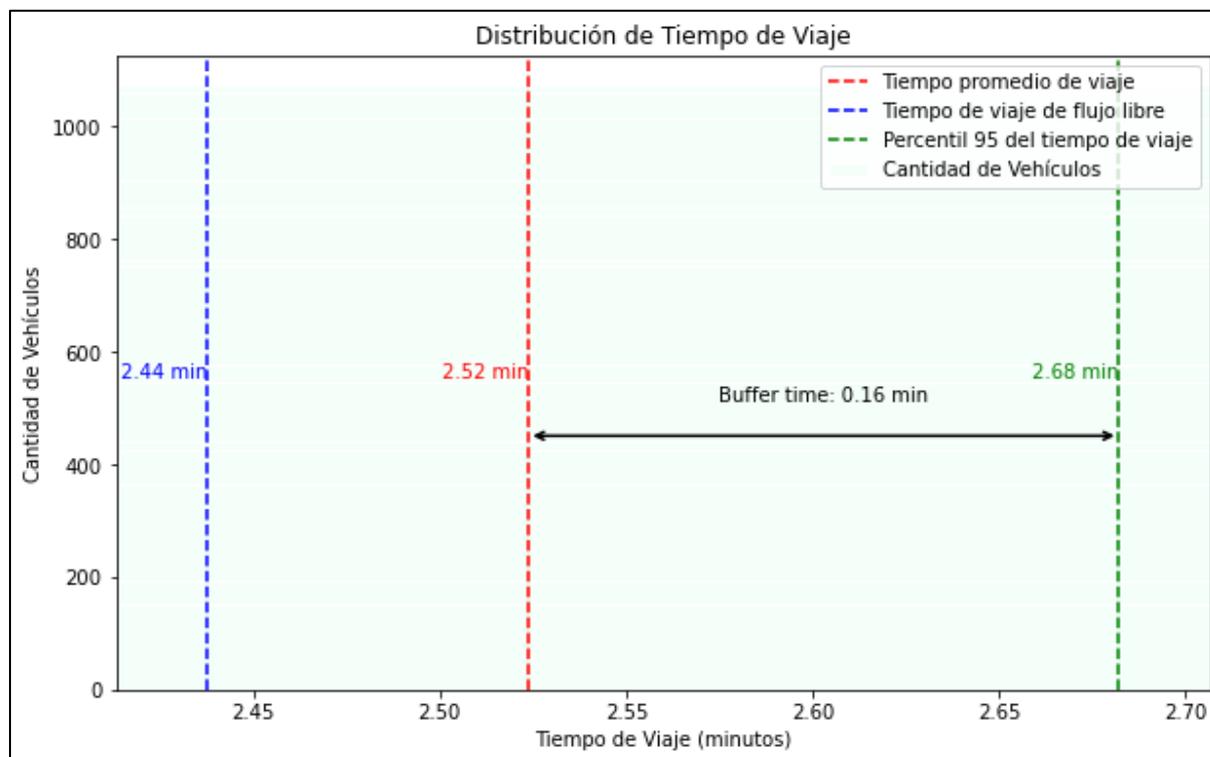


Como se muestra en la Figura 76, el tiempo de viaje correspondiente al percentil 85 de velocidad es de 3.03 minutos, lo que representa la demora normal de un vehículo si existiera flujo libre o cuando se desplaza a máxima velocidad. Mientras que el tiempo promedio de viaje en el tramo seleccionado es de 3.11 minutos correspondiente al percentil 50 de velocidad y el tiempo de viaje cuando la carretera se encuentra congestionada es de 3.29 minutos, lo cual corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje. De esta forma se cuenta con un buffer time o colchón de tiempo de 0.17 minutos, que sería el tiempo que se puede llegar a demorar en trasladarse de un lugar a otro debido a ciertas demoras que pueden atribuirse a diversas razones, incluyendo la presencia del redondel del Hospital José Carrasco Arteaga y el acceso a la vía Monay-Baguanchi, ambos puntos que experimentan un alto flujo de vehículos durante las horas pico. Este congestionamiento resulta en retrasos significativos en el tiempo de viaje. Además, se destaca la influencia del acceso al Camposanto Santa Ana, al zoológico Amaru y a la salida de la Avenida de las Américas, factores que también contribuyen a aumentar la duración del viaje debido a la congestión generada en estas áreas.

### 3.4.1.3. Desde Radar Amaru a Radar Lagunas de Oxidación

**Figura 77**

*Distribución de tiempo de viaje en el tercer sector de estudio sentido Sur Norte.*

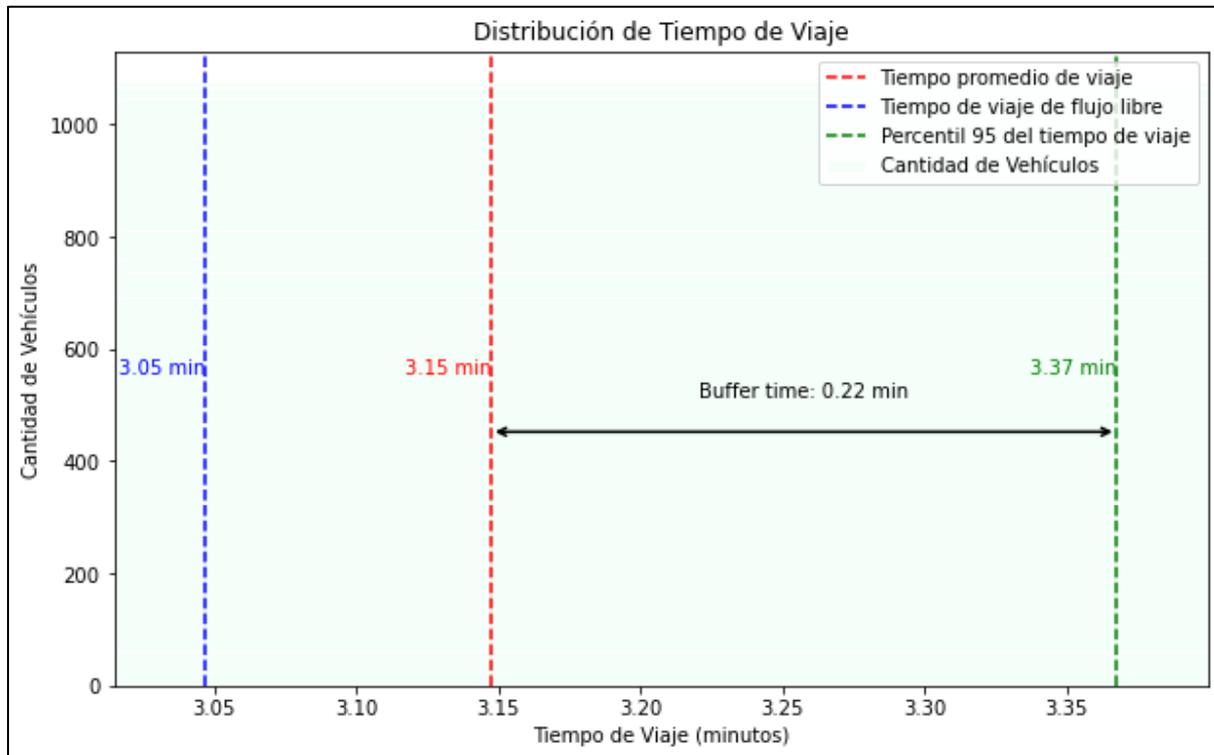


Como se muestra en la Figura 77, el tiempo de viaje correspondiente al percentil 85 de velocidad es de 2.44 minutos, lo que representa la demora normal de un vehículo si existiera flujo libre o cuando se desplaza a máxima velocidad. Mientras que el tiempo promedio de viaje en el tramo seleccionado es de 2.52 minutos correspondiente al percentil 50 de velocidad y el tiempo de viaje cuando la carretera se encuentra congestionada es de 2.68 minutos, lo cual corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje. De esta forma se cuenta con un buffer time o colchón de tiempo de 0.16 minutos, que sería el tiempo que se puede llegar a demorar en trasladarse de un lugar a otro debido a ciertas demoras. En este caso en particular, no se observan demoras significativas debido al bajo volumen de ingreso y salida de vehículos en la autopista Cuenca-Azogues. No obstante, es importante mencionar la presencia de la entrada a la parroquia Nulti, la cual podría provocar cierta congestión en el flujo del tránsito.

### 3.4.1.4. Desde Radar Lagunas de Oxidación a Radar Primax Challuabamba

**Figura 78**

*Distribución de tiempo de viaje en el cuarto sector de estudio sentido Sur Norte.*

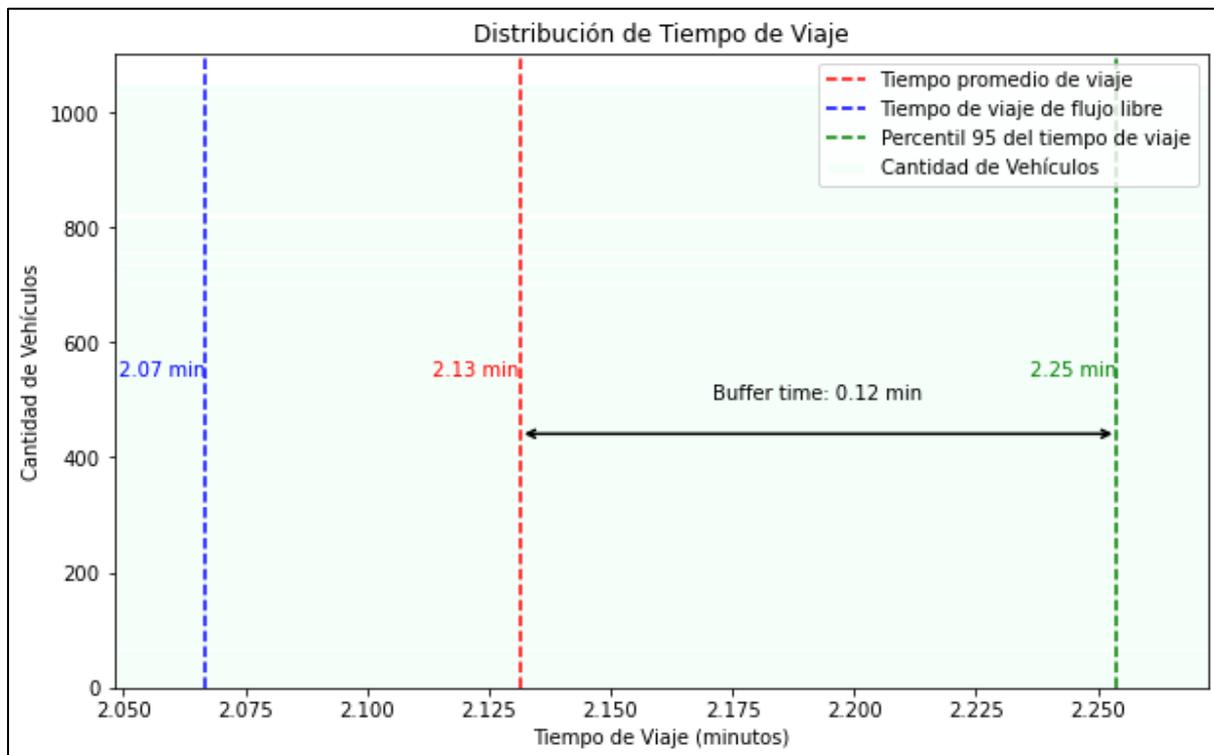


Como se muestra en la Figura 78, el tiempo de viaje correspondiente al percentil 85 de velocidad es de 3.05 minutos, lo que representa la demora normal de un vehículo si existiera flujo libre o cuando se desplaza a máxima velocidad. Mientras que el tiempo promedio de viaje en el tramo seleccionado es de 3.15 minutos correspondiente al percentil 50 de velocidad y el tiempo de viaje cuando la carretera se encuentra congestionada es de 3.37 minutos, lo cual corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje. De esta forma se cuenta con un buffer time o colchón de tiempo de 0.22 minutos, que sería el tiempo con demoras, en este caso, influenciadas por la entrada a la gasolinera Primax y el acceso a la urbanización Colinas de Challuabamba, puede variar dependiendo de varios factores, como el volumen de tráfico, la hora del día y la velocidad de circulación en la zona afectada.

### 3.4.1.5. Desde Radar Primax Challuabamba a Radar Puerta de Hierro

**Figura 79**

*Distribución de tiempo de viaje en el quinto sector de estudio sentido Sur Norte.*



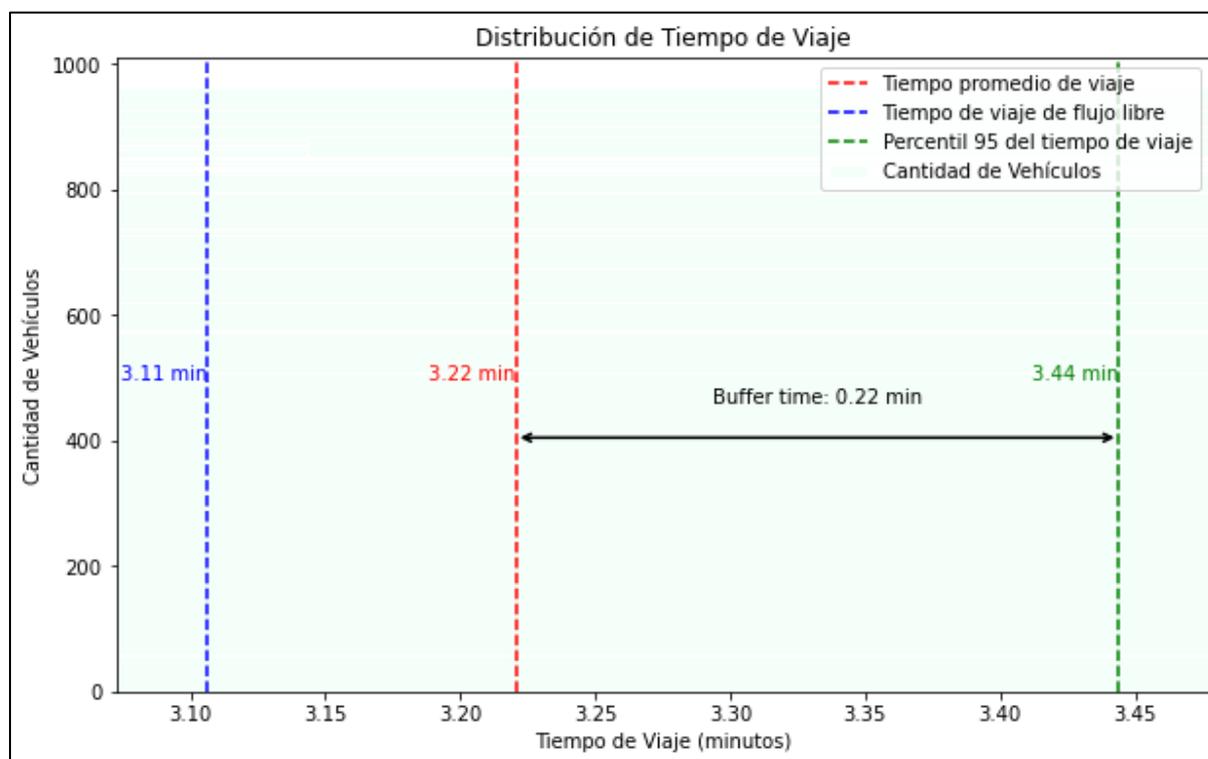
Como se muestra en la Figura 79, el tiempo de viaje correspondiente al percentil 85 de velocidad es de 2.07 minutos, lo que representa la demora normal de un vehículo si existiera flujo libre o cuando se desplaza a máxima velocidad. Mientras que el tiempo promedio de viaje en el tramo seleccionado es de 2.13 minutos correspondiente al percentil 50 de velocidad y el tiempo de viaje cuando la carretera se encuentra congestionada es de 2.25 minutos, lo cual corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje. De esta forma se cuenta con un buffer time o colchón de tiempo de 0.12 minutos, que sería el tiempo que se puede llegar a demorar en trasladarse de un lugar a otro. Las demoras pueden originarse como resultado del incremento en la densidad poblacional de la zona en los últimos años. Este crecimiento ha propiciado el establecimiento de centros comerciales y áreas residenciales, lo que conlleva la necesidad de reducir la velocidad en determinadas áreas para garantizar la seguridad de los residentes y peatones. Esta reducción en la velocidad podría resultar en demoras para los vehículos que transitan por la zona en su trayecto hacia otros destinos.

## 3.4.2. Dirección Norte Sur

### 3.4.2.1. Desde Radar Puerta de Hierro a Radar Puente de Nulti

**Figura 80**

*Distribución de tiempo de viaje en el primer sector de estudio sentido Norte Sur.*

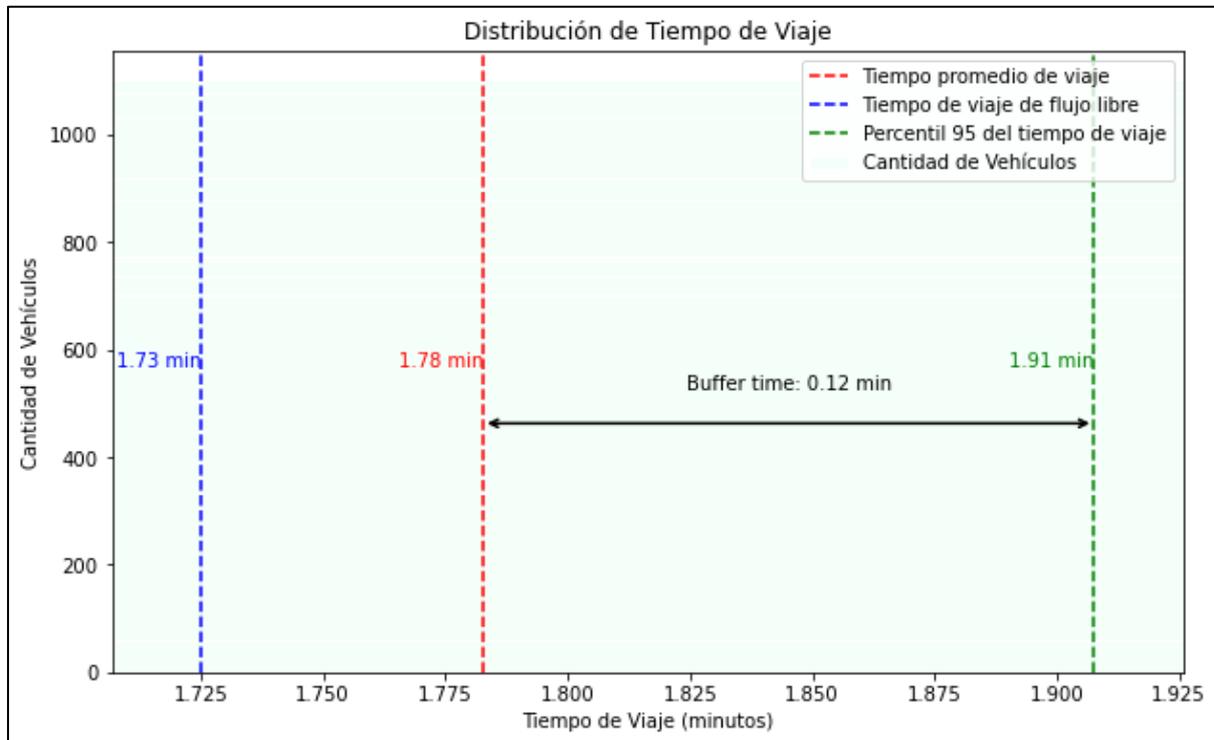


Como se muestra en la Figura 80, el tiempo de viaje correspondiente al percentil 85 de velocidad es de 3.11 minutos, lo que representa la demora normal de un vehículo si existiera flujo libre o cuando se desplaza a máxima velocidad. Mientras que el tiempo promedio de viaje en el tramo seleccionado es de 3.22 minutos correspondiente al percentil 50 de velocidad y el tiempo de viaje cuando la carretera se encuentra congestionada es de 3.44 minutos, lo cual corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje. De esta forma se cuenta con un buffer time o colchón de tiempo de 0.22 minutos, que sería el tiempo que se puede llegar a demorar en trasladarse de un lugar a otro por ciertos eventos. Las demoras pueden ser atribuidas a la configuración geométrica de la autopista Cuenca-Azogues, la cual incluye un tramo con una pendiente positiva. Esta característica topográfica, junto con el acceso a la gasolinera Primax, contribuye a la reducción de la velocidad de los vehículos y, como consecuencia, al congestionamiento vehicular en la zona. Es importante señalar que esta configuración vial puede generar un impacto significativo en la fluidez del tráfico y en los tiempos de desplazamiento de los usuarios.

### 3.4.2.2. Desde Radar Puento de Nulti a Radar Lagunas de Oxidación

**Figura 81**

*Distribución de tiempo de viaje en el segundo sector de estudio sentido Norte Sur.*

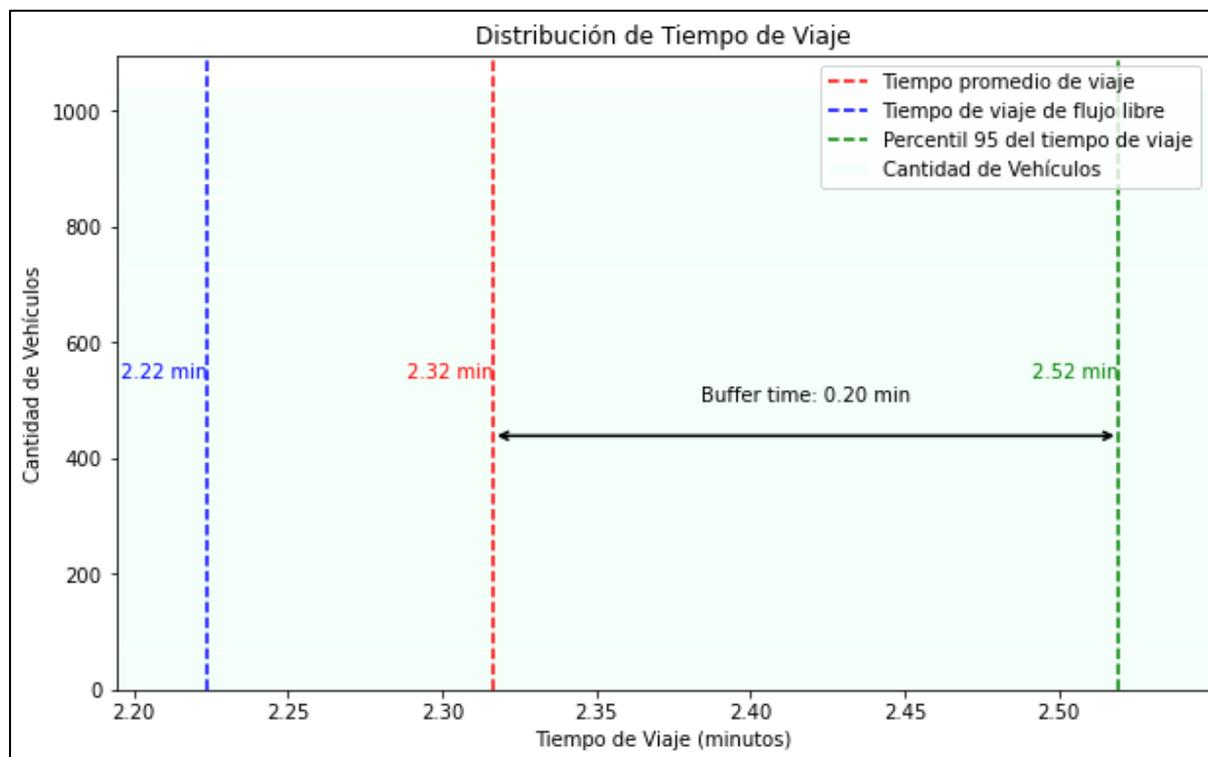


Como se muestra en la Figura 81, el tiempo de viaje correspondiente al percentil 85 de velocidad es de 1.73 minutos, lo que representa la demora normal de un vehículo si existiera flujo libre o cuando se desplaza a máxima velocidad. Mientras que el tiempo promedio de viaje en el tramo seleccionado es de 1.78 minutos correspondiente al percentil 50 de velocidad y el tiempo de viaje cuando la carretera se encuentra congestionada es de 1.91 minutos, lo cual corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje. De esta forma se cuenta con un buffer time o colchón de tiempo de 0.12 minutos, que sería el tiempo que se puede llegar a demorar en trasladarse de un lugar a otro. En este tramo no se registran entradas ni salidas de vehículos, lo que lo convierte en un área de amortiguación de tiempo, con un acercamiento a cero en términos de retardo. Sin embargo, la presencia de una pendiente positiva en el trazado de la carretera puede generar demoras significativas o incluso contribuir a la ocurrencia de accidentes, lo que a su vez podría resultar en congestión vehicular.

### 3.4.2.3. Desde Radar Lagunas de Oxidación a Radar Amaru

Figura 82

Distribución de tiempo de viaje en el tercer sector de estudio sentido Norte Sur.

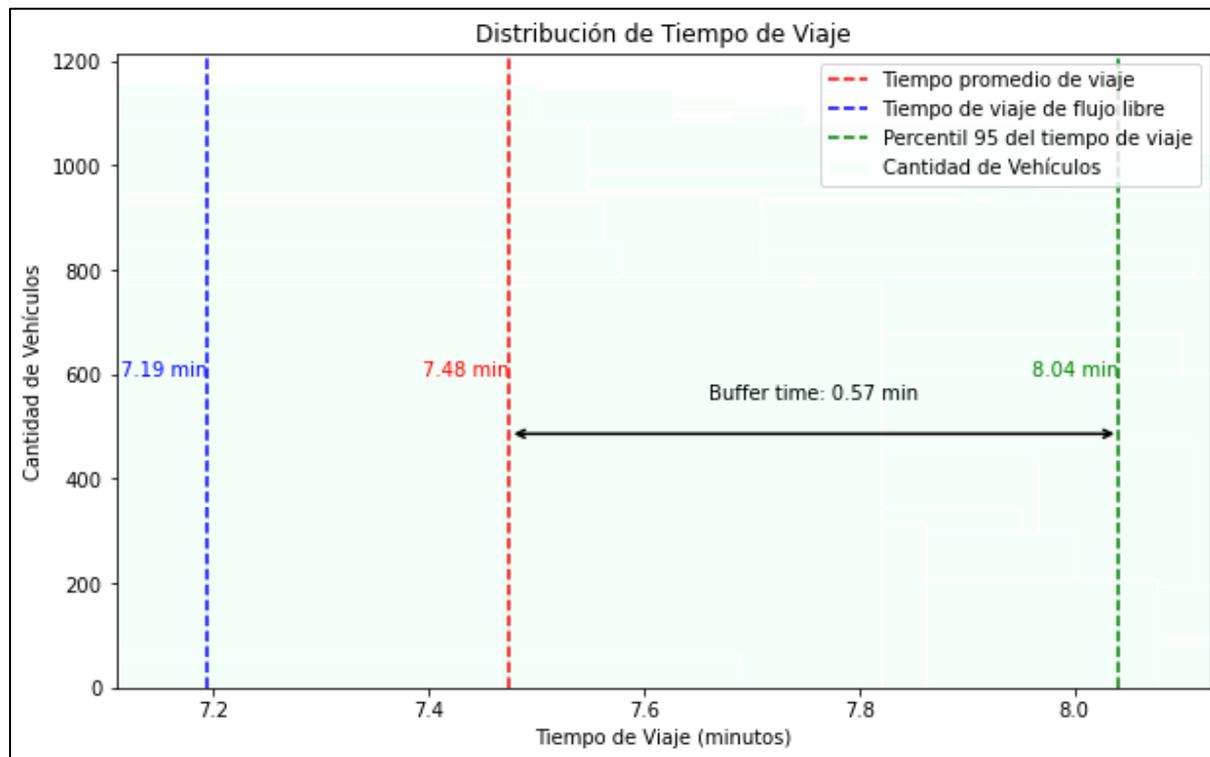


Como se muestra en la Figura 82, el tiempo de viaje correspondiente al percentil 85 de velocidad es de 2.22 minutos, lo que representa la demora normal de un vehículo si existiera flujo libre o cuando se desplaza a máxima velocidad. Mientras que el tiempo promedio de viaje en el tramo seleccionado es de 2.32 minutos correspondiente al percentil 50 de velocidad y el tiempo de viaje cuando la carretera se encuentra congestionada es de 2.52 minutos, lo cual corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje. De esta forma se cuenta con un buffer time o colchón de tiempo de 0.20 minutos, que sería el tiempo que se puede llegar a demorar en trasladarse de un lugar a otro. El tramo de carretera en cuestión cuenta con un desvío en la autopista Cuenca-Azogues que facilita el acceso a la parroquia de Nulti. Además, presenta pendientes pronunciadas, lo que puede intensificar el congestionamiento vehicular y, por ende, prolongar las demoras en el tiempo de viaje.

### 3.4.2.4. Desde Radar Amaru a Radar Vista Linda

**Figura 83**

*Distribución de tiempo de viaje en el cuarto sector de estudio sentido Norte Sur.*



Como se muestra en la Figura 83, el tiempo de viaje correspondiente al percentil 85 de velocidad es de 7.19 minutos, lo que representa la demora normal de un vehículo si existiera flujo libre o cuando se desplaza a máxima velocidad. Mientras que el tiempo promedio de viaje en el tramo seleccionado es de 7.48 minutos correspondiente al percentil 50 de velocidad y el tiempo de viaje cuando la carretera se encuentra congestionada es de 8.04 minutos, lo cual corresponde al percentil 95 del tiempo de viaje. De esta forma se cuenta con un buffer time o colchón de tiempo de 0.57 minutos, que sería el tiempo que se puede llegar a demorar en trasladarse de un lugar a otro.

Debido a que este tramo representa la sección más extensa de la autopista Cuenca-Azogues entre los puntos de control (radares), el colchón de tiempo experimenta un aumento notable. Este fenómeno se atribuye a la mayor probabilidad de incidencias en la vía, así como a la presencia de múltiples accesos y salidas a lo largo de la autopista. Los puntos de mayor congestión vehicular se concentran en los redondeles, en particular el redondel situado en el Hospital José Carrasco Arteaga y el redondel de Gapal. Estos puntos, especialmente durante las horas de mayor demanda, experimentan un flujo de tráfico considerable que afecta la circulación fluida en la carretera.

### 3.5. Nivel de Servicio

Según la Tabla 2, la clasificación de nivel de servicio para cada tramo de la autopista Cuenca-Azogues sería cómo se muestra en la Tabla 4:

**Tabla 4**

*Nivel de Servicio para cada tramo de la autopista en función del TTI.*

Dirección	Desde	Hasta	Índice de Tiempo de Viaje	Nivel de servicio
Sur Norte	Vista Linda	Max Uhle	1.25	B
	Max Uhle	Amaru	1.24	B
	Amaru	Lagunas de Oxidación	1.31	C
	Lagunas de Oxidación	Primax Challuabamba	1.34	C
	Primax Challuabamba	Urbanización Puerta de Hierro	1.25	B
Norte Sur	Urbanización Puerta de Hierro	Puente de Nulti	1.17	B
	Puente de Nulti	Lagunas de Oxidación	1.23	B
	Lagunas de Oxidación	Amaru	1.28	B
	Amaru	Vista Linda	1.28	B

*Nota.* Datos tomados de los análisis anteriores.

Para estimar el nivel de servicio total de la autopista Cuenca-Azogues se realizó una ponderación en función del TTI (Travel Time Index) calculado para cada dirección y la longitud de la mismo, como se observa en la Tabla 5:

**Tabla 5**

*Nivel de Servicio para cada dirección en función del TTI.*

Dirección	Travel Time Index Ponderado	Nivel de Servicio
Sur Norte	1.28	B
Norte Sur	1.25	B

*Nota.* Calculado mediante ponderación con las longitudes de cada tramo.

## 4. Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

El análisis de congestión vehicular revela que agosto es el mes más congestionado en la dirección Sur Norte, mientras que en la dirección Norte Sur es abril. Los viernes son los días de mayor demanda vehicular, con picos entre las 7 a.m. y 8 a.m. en la dirección Sur Norte, y entre las 5 p.m. y 6 p.m. en la dirección Norte Sur. También se observan picos menores los domingos de 6 p.m. a 7 p.m.

El análisis de velocidades medias revela que en la dirección Sur Norte, el radar en Max Uhle registra la velocidad máxima con 72.08 km/h, mientras que en la dirección Norte Sur, el radar en la urbanización Puerta de Hierro es el que registra la velocidad máxima con 74.80 km/h. Se destaca que junio presenta las velocidades más altas en ambas direcciones y se observa un mayor incumplimiento de los límites de velocidad en la dirección Norte Sur.

El análisis del flujo vehicular utilizando el modelo de Greenshields no se completa totalmente debido a la baja congestión que impide generar las curvas esperadas. Esto se debe a que el modelo se basa en velocidades promedio en lugar de considerar las velocidades individuales de cada vehículo. A pesar de esta limitación, el enfoque macroscópico proporciona una comprensión general del flujo vehicular en la autopista.

El análisis de confiabilidad de tiempo de viaje identificó el sector más congestionado desde el radar Amaru hasta el radar ubicado en la gasolinera Primax Challuabamba en la dirección Sur Norte, donde se presentó un LOS "C" debido a sus respectivos TTI de 1.31 y 1.34.

Por otro lado, al realizar el cálculo de nivel de servicio ponderado para cada dirección de la autopista en función del TTI y la longitud de cada tramo, se presentó un LOS "B" para ambas direcciones con un TTI de 1.28 para la dirección Sur Norte y 1.25 para la dirección Norte Sur, mostrando un nivel similar de congestionamiento.

### 4.2. Recomendaciones

Se recomienda la implementación de modelos predictivos de tráfico basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático, que pueden mejorar aún más la precisión de las estimaciones de tiempo de viaje y permitir respuestas en tiempo real a los cambios en las condiciones del tráfico, lo que puede incluir alertas en tiempo real para accidentes, congestiones y otros eventos que afecten el flujo vehicular, contribuyendo al desarrollo de una ciudad inteligente.

Impulsar la creación de un sistema de gestión del tráfico integrado que combine datos de sensores de radar, cámaras de tráfico, y otras fuentes de datos para la monitorización y

gestión del tráfico de manera efectiva por parte de la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte (EMOV).

Promover la colaboración entre la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte (EMOV) y los centros de estudios de la ciudad como la Universidad de Cuenca, para actualizar recurrentemente las bases de datos obtenidos por los sensores de radar. Estos convenios no solo facilitarían el intercambio de datos, recursos y tecnologías, sino que también permitiría un análisis continuo y exhaustivo del estado de la autopista. De esta manera, se podrían superar las limitaciones de trabajar únicamente con velocidades medias, al tener acceso a información más detallada y actualizada sobre el tráfico.

Por último, se sugiere realizar investigaciones futuras que exploren el impacto de variables adicionales como las condiciones meteorológicas, eventos especiales y patrones de viaje estacionales en el tráfico de la autopista. Además, se pueden investigar nuevos modelos de tráfico y técnicas de análisis para seguir optimizando la gestión del tráfico y contribuir al desarrollo de soluciones inteligentes para la movilidad urbana.

## Referencias

- Arafeh, M., Dion, F., El-Shawarby, I., Rakha, H. (2006). Estimating Path Travel-Time Reliability.
- Cal y Mayor R., Cárdenas J. (2018). Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones 9a. edición. Alfaomega
- Chen, C., Varaiya P. (2005). An Empirical Assessment of Traffic Operations.
- Choe, T., Skabardonis, A., & Varaiya, P. (2002). Freeway performance measurement system: operational analysis tool. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1811, 67-75.
- Coifman, B., & Cassidy, M. (2002). Vehicle reidentification and travel time measurement on congested freeways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(10), 899-917.
- DKS Associates. (2002). High Occupancy Vehicle (HOV) Lane Master Plan Update. Prepared for Metropolitan Transportation Commission, Caltrans District 4, and the California Highway Patrol Golden Gate Division.
- Jalali, S. (2023). Travel time reliability: How to measure and why it is important?
- Lin, F. & Su, C. (1998). A methodology for capacity and level of service analysis of freeway basic sections. *Transportation Planning Journal*, 27(1), 1-34.
- Lint, J. W. C., Zuylen, H. J., & Tu, H. (2008). Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story. *Transportation Research Part A*, 42, 258-277.
- May, A. (1990). Traffic flow fundamentals. University of California, Berkeley, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Mehran, B., & Nakamura, H. (2009). *Implementing travel time reliability for evaluation of congestion relief schemes on expressways*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2124(1), 137-147.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2011). Estudios definitivos de la carretera Cuenca-Azogues-Biblián: Rehabilitación del tramo Cuenca (Salado)-Guangarcucho-Actual paso de Azogues-y tramo Azogues-Biblián, ampliación del tramo: Guangarcucho-Azogues (incluye puentes); estudios definitivos de ingeniería de la

nueva vía de cuatro carriles entre Azogues y Biblián. Estudio de taludes inestables y sitios críticos, provincias de Azuay y Cañar.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2020a). Informe de Evaluación Técnica, Diseño, Financiamiento, Construcción, Operación y Mantenimiento Vial del corredor Cumbe – Cuenca (Acceso Sur a Cuenca) – Azogues – Biblián.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2020b). Estudio complementario y actualización del plan de manejo ambiental del diseño de pavimento en el tramo Cuenca-Guangarcucho y ampliación de la carretera Cuenca-Azogues-Biblián.

Ministry of Transportation of Canada. (2003). Review and analysis of posted speed limit and speed limit setting practices in British Columbia. Final report.

Munizaga, M., Devillaine, F., Navarrete, C., & Silva, D. (2014). Validating travel behavior estimated from smartcard data. *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*, 44, 70–79.

Navarro, M., Herrera, J. (2013). Usos de Tiempos de Viaje en la Estimación de Indicadores de Congestión.

National Academies of Sciences Engineering and Medicine, & Transportation Research Board. (2022). *Highway capacity manual 7th edition: A guide for multimodal mobility analysis*. National Academies Press.

Pu, W. (2011). "Analytic Relationships Between Travel Time Reliability Measures." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2254(-1): 122-130.

Russell, M. (2014). *Travel Time Reliability and Level of Service*.

Texas Transportation Institute y Cambridge Systematics, Inc. (2009). *Travel Time Reliability: Making It There on Time, All the Time*. FHWA Office of Operations, U.S. Department of Transportation.

U.S. Department of Transportation (2019). Does Travel Time Reliability Matter? Recuperado de <https://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop19062/whatis.htm>

Yang, H. (2015a). Cumulative Curve and Oblique Curve.

Yang, H. (2015b). *Travel Time Estimation & Travel Time Reliability*

## Anexos

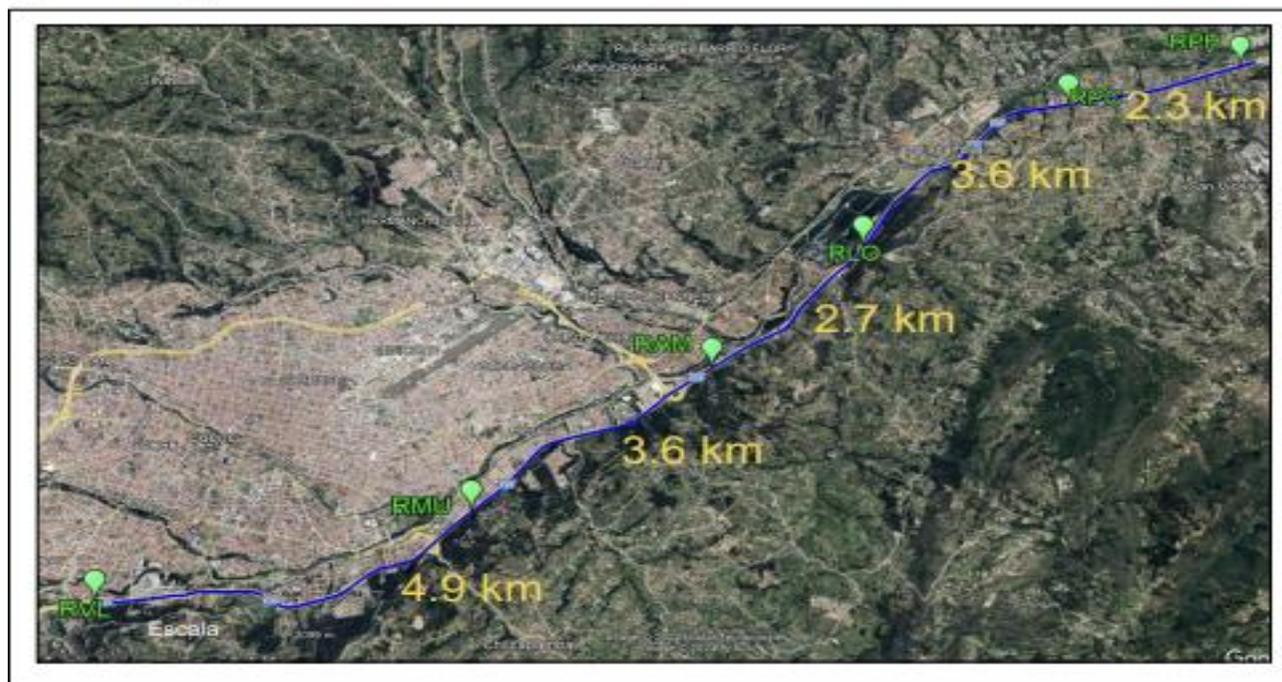
### Anexo A: Ubicación de radares en dirección Sur Norte.

#### Ubicación de Rades en Dirección Sur Norte



RPH: Radar Puerta de Hierro  
RPC: Radar Primax Challuabamba  
RLO: Radar Lagunas de Oxidación

RAM: Radar Amaru  
RMU: Radar Max Uhle  
RVL: Radar Vista Linda



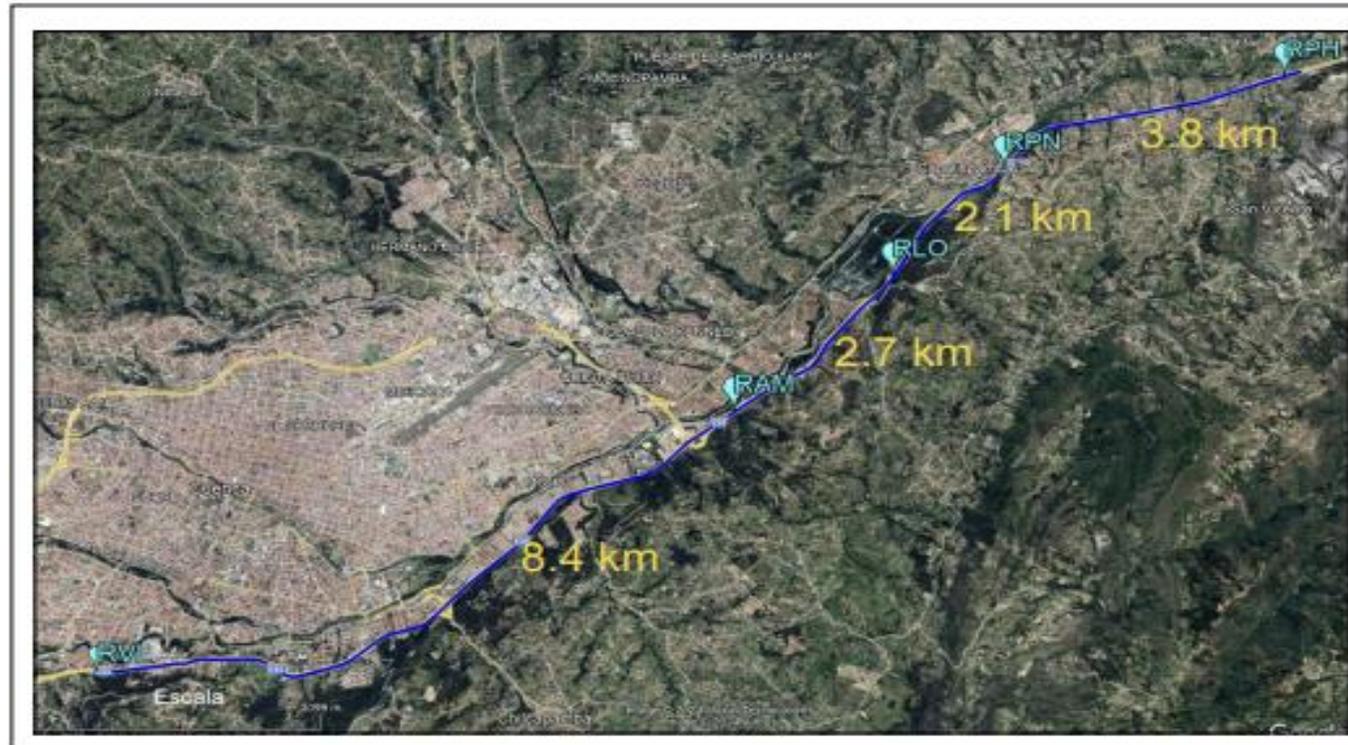
## Anexo B: Ubicación de radares dirección Norte Sur

### Ubicación de Rades en Dirección Norte Sur



RPH: Radar Puerta de Hierro  
RPN: Radar Puente de Nulti  
RLO: Radar Lagunas de Oxidación

RAM: Radar Amaru  
RVL: Radar Vista Linda



**Anexo C: Oficio dirigido a la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte (EMOV).**

Cuenca, 25 septiembre, 2023

Dr.

Darío Ordoñez Aray

**GERENTE GENERAL EMOV EP**

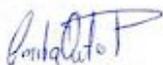
Su despacho.-

De mi consideración

Me permito dirigirme a usted con un cordial saludo y el más profundo respeto. Yo Emilia Carolina Quito Pacurucu de cédula de identidad 0105284335, en calidad de estudiante de último año de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, acudo a usted para solicitar muy encarecidamente y con fines netamente académicos que me facilite los datos de velocidades que siguen emitiendo los radares a pesar de que no existan contravenciones ubicados a lo largo de la Autopista Cuenca - Azogues, en ambos sentidos, ubicados en: [ Sector Vista Linda (-2.921021, -79.020554; -2.921024, -79.020221); Sector Max Uhle (-2.909788, -78.981800); Sector Zoológico Amaru (-2.891159, -78.956398; -2.891101, -78.956526); Sector Lagunas de Oxigenación (-2.874535, -78.939701; -2.874521, -78.939703); Sector Puente Peatonal Multi (-2.861028, -78.927493); Sector PRIMAX Challuabamba (-2.854492, -78.916279); Sector Urbanización Puerta de Hierro (-2.848875, -78.896626; -2.848867, -78.896558)] así como en el que se encuentra en la Av. Enrique Arízaga Toral [ Sector San Joaquín (-2.890898, -79.059171; -2.890799, -79.059377) desde Enero a Septiembre de 2024, ya que me encuentro desarrollando mi trabajo de titulación de graduación, el mismo que se centra en análisis de flujo de tráfico, siendo la velocidad un parámetro fundamental para el análisis.

Agradezco de antemano su amable atención a esta solicitud y quedo a su disposición para proporcionar cualquier información adicional que pueda ser necesaria para tomar una decisión

Atentamente,



Emilia Carolina Quito Pacurucu  
Estudiante de Ing. Civil  
emilia.quito@ucuenca.edu.ec



Ing. Diego Correa Barahona  
Tutor de Trabajo de Titulación  
diego.correa@ucuenca.edu.ec



EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL  
DE MOVILIDAD, TRÁNSITO  
Y TRANSPORTE



SOLICITUD DE ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA

Cuenca, 22 de Septiembre de 2023

Economista  
Fabián Moscoso Rosales  
Gerente General EMOV EP

Presente.

De mi consideración:

En ejercicio de mi derecho constitucional de acceder a la información pública, solicito a Usted la siguiente información:

Datos de velocidades que siguen emitiendo los radares, a pesar de que no existan contravenciones en: Autopista Cuzco Azuques en ambos sentidos (Sector vitalinda, Max Dñie, Zoológico Amaru, Laguna Origenación, Puente de Nuñe) Sector Primavera Chulibombá y Av Enrique Arizaga Toral (Sector San Joaquín ambos sentidos)

**IMPORTANTE:** Referir de manera concreta el documento o información que solicita.

Información que reposa en los archivos custodiados por:

Formato electrónico digital: Dr. Gustavo Toledo  
Gerencia de control de Tránsito y Transporte

**IMPORTANTE:** Referir de manera concreta el nombre de la Dirección o Unidad en donde se ubiquen los datos o temas motivo de la solicitud.

La información que solicito, la recibiré de la siguiente manera: Por favor marcar una opción

1	Mediante correo electrónico:	<u>emilia.quito @ucuenca.edu.ec</u>
	Formato electrónico digital:	PDF <input type="checkbox"/> WORD <input type="checkbox"/> EXCEL <input checked="" type="checkbox"/>
2	De manera personal en la Institución, en:	Copia simple <input type="checkbox"/> Copia certificada <input type="checkbox"/> CD <input type="checkbox"/>

Para ello, en función lo que establece la LOTAIP, a continuación registro mis datos personales:

Nombres y Apellidos: Emilia Carolina Quito Pacurucu      C.C.: 010928433-5  
 Dirección domiciliaria: Juan de Velasco y Cacique Chacabá      Teléfono: 0987423791

Emilia Q.T.  
Firma del o la solicitante

Con copia a: Secretaría General, Unidad de Transparencia.

----- A continuación información para manejo interno institucional -----

**CONSTANCIA DE CONTESTACIÓN A LA SOLICITUD DE ACCESO A LA INFORMACIÓN PÚBLICA:**

Fecha de contestación:	Hora:	Firma de recepción o referencia del correo remitido:

LOTAIP:  
 Art. 4 literal b) - El acceso a la información pública, será por regla general gratuito o excepción de los costos de reproducción, y estará regulado por las normas de esta Ley.  
 Art. 5 - Información Pública - Se considera información pública, todo documento en cualquier formato, que se encuentre en poder de las instituciones públicas y de las personas jurídicas o los que se refiera a esta Ley, contenidos, creados u obtenidos por ellas, que se encuentren bajo su responsabilidad o se hayan producido con recursos del Estado.  
 Art. 18 - El plazo general para la respuesta de las solicitudes es de diez días, con cinco días de prórroga por causas debidamente justificadas.

## Anexo D: Código Congestionamiento Vehicular y Horas Pico.

```

import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from openpyxl import load_workbook
import numpy as np
import os

# Lee los datos desde el archivo Excel
archivo_excel = "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento
Vehicular/AMARU NORTE SUR.xlsx"

workbook = load_workbook(filename=archivo_excel)

nombre_archivo = os.path.basename(archivo_excel).replace('.xlsx', '')

# Define las etiquetas personalizadas del eje y para las horas en el mapa
de calor

etiquetas_y_calor = []
for hora in range(24):
    for minuto in range(0, 60, 60):
        etiquetas_y_calor.append(f"{hora:02d}:00          a
{hora:02d}:{minuto+59:02d}")

# Crear la figura para los mapas de calor
fig, axs_heatmap = plt.subplots(2, 4, figsize= (20, 12), sharey=True)
fig.suptitle(f'Congestionamiento vehicular - {nombre_archivo}',
fontsize=18)

# Crear los mapas de calor en subplots
for i, hoja in enumerate(workbook.sheetnames):
    # Lee los datos de la hoja actual
    datos = pd.read_excel(archivo_excel, sheet_name=hoja)
    # Excluye la fila 50 y la columna 11
    datos_excluidos = datos.iloc[:48, :10]
    # Suma los datos por horas
    datos_por_horas = datos_excluidos.groupby(datos_excluidos.index //
2).sum()
    # Grafica el mapa de calor en el subplot correspondiente
    sns.heatmap(datos_por_horas, cmap="viridis", ax=axs_heatmap[i//4, i%4],
yticklabels=etiquetas_y_calor, cbar=False, linewidths=0.5)
    axs_heatmap[i//4, i%4].set_title(hoja, fontsize=12)

# Ajustar el espacio vertical entre las filas

```

```
plt.subplots_adjust(hspace=0.4, wspace=0.2)
# Ajustar el diseño y agregar una única barra de color al lado
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 0.9, 0.95])
cbar_ax = fig.add_axes([0.92, 0.15, 0.02, 0.7])
fig.colorbar(axes_heatmap[0, 0].collections[0], cax=cbar_ax)
# Crear la figura para los gráficos de barras verticales
fig_bars, axes_bars = plt.subplots(4, 2, figsize=(20, 12),
sharex=True, sharey=True)
fig_bars.suptitle(f'HORAS PICO - {nombre_archivo}', fontsize=18)
# Crear los gráficos de barras verticales en subplots
for i, hoja in enumerate(workbook.sheetnames):
    # Lee los datos de la hoja actual
    datos = pd.read_excel(archivo_excel, sheet_name=hoja)
    # Extrae la columna 11
    columna_11 = datos.iloc[:, 10]
    # Suma los datos por horas
    datos_por_horas = columna_11.groupby(columna_11.index // 2).sum()
    # Obtener la paleta de colores
    colores = plt.cm.viridis(datos_por_horas / datos_por_horas.max()) #
Normalizar los valores para obtener colores entre 0 y 1
    # Grafica el gráfico de barras vertical en el subplot correspondiente
    axes_bars[i//2, i%2].bar(np.arange(len(datos_por_horas)),
datos_por_horas, color=colores)
    axes_bars[i//2, i%2].set_title(hoja, fontsize=12)
    axes_bars[i//2, i%2].set_ylabel('Cantidad de vehículos') # Establecer el
nombre del eje y
    # Ajustar las etiquetas del eje x para que sean más legibles
    axes_bars[i//2, i%2].set_xticks(np.arange(len(datos_por_horas)))
    axes_bars[i//2, i%2].set_xticklabels(etiquetas_y_color, rotation=45,
ha='right', fontsize=8)
# Ajustar el diseño
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 0.9, 0.95])
# Añadir una escala de color para el gráfico de barras verticales
sm = plt.cm.ScalarMappable(cmap='viridis', norm=plt.Normalize(vmin=0,
vmax=1))
sm.set_array([])
```

```
cbar = plt.colorbar(sm, ax=axis_bars)
cbar.set_label('Proporción del máximo')
# Mostrar los gráficos
plt.show()
```

### Anexo E: Código Congestionamiento Vehicular y Horas Pico Agregados

```
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from openpyxl import load_workbook
import numpy as np
import os
# Lista de archivos Excel a procesar
lista_archivos = [
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/VISTA LINDA SUR NORTE.xlsx",
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/MAX UHLE SUR NORTE.xlsx",
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/AMARU SUR NORTE.xlsx",
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/LAGUNAS SUR NORTE.xlsx",
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/PRIMAX SUR NORTE.xlsx",
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/PUERTA DE HIERRO SUR NORTE.xlsx",
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/PUERTA DE HIERRO NORTE SUR.xlsx",
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/PUENTE MULTI NORTE SUR.xlsx",
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/LAGUNAS NORTE SUR.xlsx",
```

```
"C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/AMARU NORTE SUR.xlsx",
```

```
"C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Congestionamiento Vehicular/VISTA LINDA NORTE SUR.xlsx",
```

```
]
```

```
# Definir las etiquetas personalizadas del eje y para las horas en el mapa de calor
```

```
etiquetas_y_calor = []
```

```
for hora in range(24):
```

```
    for minuto in range(0, 60, 60):
```

```
        etiquetas_y_calor.append(f"{hora:02d}:00                                a  
{hora:02d}:{minuto+59:02d}")
```

```
# Inicializar estructuras para sumar los datos
```

```
suma_datos_primera_parte = None
```

```
suma_datos_segunda_parte = None
```

```
suma_barras_primera_parte = None
```

```
suma_barras_segunda_parte = None
```

```
# Procesar los primeros 6 archivos
```

```
for archivo_excel in lista_archivos[1:6]:
```

```
    workbook = load_workbook(filename=archivo_excel)
```

```
    for hoja in workbook.sheetnames:
```

```
        # Lee los datos de la hoja actual
```

```
        datos = pd.read_excel(archivo_excel, sheet_name=hoja)
```

```
        # Excluye la fila 50 y la columna 11
```

```
        datos_excluidos = datos.iloc[:48, :10]
```

```
        # Suma los datos por horas
```

```
        datos_por_horas = datos_excluidos.groupby(datos_excluidos.index //  
2).sum()
```

```
        if suma_datos_primera_parte is None:
```

```
        suma_datos_primera_parte = datos_por_horas

    else:

        suma_datos_primera_parte += datos_por_horas

    # Extrae la columna 11
    columna_11 = datos.iloc[:48, 10]

    # Extrae la columna 11
    columna_10 = datos.iloc[:48, 9]

    # Extrae la columna 11
    columna_9 = datos.iloc[:48, 8]

    columnafinal=columna_11-columna_10-columna_9

    # Suma lo datos por horas

    datos_barras_por_horas = columnafinal.groupby(columnafinal.index //
2).sum()

    if suma_barras_primera_parte is None:

        suma_barras_primera_parte = datos_barras_por_horas

    else:

        suma_barras_primera_parte += datos_barras_por_horas

# Procesar los siguientes 5 archivos
for archivo_excel in lista_archivos[6:11]:

    workbook = load_workbook(filename=archivo_excel)

    for hoja in workbook.sheetnames:

        # Lee los datos de la hoja actual

        datos = pd.read_excel(archivo_excel, sheet_name=hoja)

        # Excluye la fila 50 y la columna 11

        datos_excluidos = datos.iloc[:48, :10]

        # Suma los datos por horas

        datos_por_horas = datos_excluidos.groupby(datos_excluidos.index //
2).sum()
```

```
    if suma_datos_segunda_parte is None:
        suma_datos_segunda_parte = datos_por_horas
    else:
        suma_datos_segunda_parte += datos_por_horas

# Extrae la columna 11
columna_11 = datos.iloc[:48, 10]

# Suma los datos por horas
datos_barras_por_horas = columna_11.groupby(columna_11.index //
2).sum()

if suma_barras_segunda_parte is None:
    suma_barras_segunda_parte = datos_barras_por_horas
else:
    suma_barras_segunda_parte += datos_barras_por_horas

# Crear figura y ejes para los mapas de calor
fig, axs = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 10))

# Mapa de calor para la suma de los primeros 6 archivos (Sur-Norte)
sns.heatmap(suma_datos_primera_parte, cmap="viridis",
yticklabels=etiquetas_y_calor, ax=axs[0], linewidths=0.5)

axs[0].set_title('Congestionamiento Vehicular - Dirección Sur Norte')

# Mapa de calor para la suma de los siguientes 5 archivos (Norte-Sur)
sns.heatmap(suma_datos_segunda_parte, cmap="viridis",
yticklabels=etiquetas_y_calor, ax=axs[1], linewidths=0.5,
cbar_kws={'label': 'Cantidad de Vehículos'})

axs[1].set_title('Congestionamiento Vehicular - Dirección Norte Sur')

# Ajustar el espaciado entre subplots
plt.tight_layout()

# Crear figura y ejes para los gráficos de barras
fig, axs = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 10))

# Gráfico de barras para la suma de los primeros 6 archivos (Sur-Norte)
```

```
colores = plt.cm.viridis(suma_barras_primera_parte /
suma_barras_primera_parte.max())

barplot1 = axs[0].bar(np.arange(len(suma_barras_primera_parte)),
suma_barras_primera_parte, color=colores)

axs[0].set_title('Horas Pico - Dirección Sur Norte')

axs[0].set_ylabel('Cantidad de Vehículos')

axs[0].set_xticks(np.arange(len(suma_barras_primera_parte)))

axs[0].set_xticklabels(etiquetas_y_calor, rotation=45, ha='right',
fontsize=8)

# Añadir la barra de color al lado del primer gráfico de barras
# cbar1 = fig.colorbar(barplot1, ax=axs[0], fraction=0.05)
# cbar1.set_label('Cantidad de Vehículos')

# Gráfico de barras para la suma de los siguientes 5 archivos (Norte-Sur)

colores = plt.cm.viridis(suma_barras_segunda_parte /
suma_barras_segunda_parte.max())

barplot2 = axs[1].bar(np.arange(len(suma_barras_segunda_parte)),
suma_barras_segunda_parte, color=colores)

axs[1].set_title('Horas Pico - Dirección Norte Sur')

axs[1].set_ylabel('Cantidad de Vehículos')

axs[1].set_xticks(np.arange(len(suma_barras_segunda_parte)))

axs[1].set_xticklabels(etiquetas_y_calor, rotation=45, ha='right',
fontsize=8)

# Añadir la barra de color al lado del segundo gráfico de barras
# cbar2 = fig.colorbar(barplot2, ax=axs[1], fraction=0.05)
# cbar2.set_label('Cantidad de Vehículos')

plt.tight_layout(rect=[0, 0, 0.9, 0.95])

# Añadir una escala de color para el gráfico de barras verticales

sm = plt.cm.ScalarMappable(cmap='viridis', norm=plt.Normalize(vmin=0,
vmax=1))

sm.set_array([])
```

```
cbar = plt.colorbar(sm, ax=axis)
cbar.set_label('Proporción del máximo')
# Ajustar el espaciado entre subplots
# plt.tight_layout()
# Mostrar los gráficos
plt.show()
```

### Anexo F: Código Velocidad de Punto y Percentiles.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import interp1d
import numpy as np
import os

# Ruta del archivo Excel
archivo_excel = "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y
Percentiles/5. PRIMAX SUR NORTE P.xlsx"

# Extraer el nombre del archivo sin la ruta ni la extensión
nombre_archivo = os.path.basename(archivo_excel).rsplit('.', 1)[0]

# Eliminar dígitos al inicio del nombre del archivo
nombre_archivo_sin_numero = nombre_archivo.lstrip("0123456789.")

# Eliminar la última letra "P" del nombre del archivo si existe
if nombre_archivo_sin_numero.endswith('P'):
    nombre_archivo_sin_numero = nombre_archivo_sin_numero[:-1]

# Leer el archivo Excel y distinguir las fechas en la primera columna
datos = pd.read_excel(archivo_excel, parse_dates=[0])

# Definir los meses con datos disponibles (abril a noviembre)
meses_con_datos = range(4, 12)

# Definir los nombres de los meses en español
```

```
nombres_meses = ['Abril', 'Mayo', 'Junio', 'Julio', 'Agosto', 'Septiembre',
                 'Octubre', 'Noviembre']

# Definir los percentiles de interés

percentiles_interes = [0.15, 0.50, 0.85, 0.95]

# Definir los colores para cada percentil

colores = ['blue', 'orange', 'green', 'red']

# Crear el subplot de 2x4 para los gráficos

fig, axs = plt.subplots(2, 4, figsize=(16, 8), sharey=True, sharex=True)

fig.suptitle(f'velocidades Medias Acumuladas por Percentil y Mes -
{nombre_archivo_sin_numero}', fontsize=16)

# Iterar sobre los meses y crear los gráficos correspondientes

for i, (mes, nombre_mes) in enumerate(zip(meses_con_datos, nombres_meses)):

    # Filtrar los datos para el mes actual

    datos_mes = datos[datos['Fecha'].dt.month == mes]

    # Calcular las velocidades acumuladas para cada percentil en el mes
    actual

    velocidades_acumuladas = []

    for percentil in percentiles_interes:

        velocidad_acumulada = datos_mes['Velocidad
media'].quantile(percentil)

        velocidades_acumuladas.append(velocidad_acumulada)

    # Interpolar los datos para suavizar la línea

    f = interp1d(percentiles_interes, velocidades_acumuladas, kind='cubic')

    percentiles_interpolados = np.linspace(min(percentiles_interes),
max(percentiles_interes), 100)

    velocidades_interpoladas = f(percentiles_interpolados)

    # Graficar los datos en el subplot correspondiente

    axs[i // 4, i % 4].plot(percentiles_interpolados,
velocidades_interpoladas, label=nombre_mes, color='blue')

    axs[i // 4, i % 4].set_title(nombre_mes)
```

```

    axs[i // 4, i % 4].grid(True)

    axs[i // 4, i % 4].set_xlabel('Percentil')
    axs[i // 4, i % 4].set_ylabel('velocidad (km/h)')

    # Agregar líneas entrecortadas desde el eje x y y
    for j, perc in enumerate(percentiles_interes):
        axs[i // 4, i % 4].plot([perc, perc], [55,
        velocidades_acumuladas[j]], color=colores[j], linestyle='--')

        axs[i // 4, i % 4].plot([0, perc], [velocidades_acumuladas[j],
        velocidades_acumuladas[j]], color=colores[j], linestyle='--')

    # Agregar los valores correspondientes a los percentiles en la curva
    for j, perc in enumerate(percentiles_interes):
        axs[i // 4, i % 4].plot(perc, velocidades_acumuladas[j], 'ro')

        axs[i // 4, i % 4].text(perc, velocidades_acumuladas[j],
        f'{round(velocidades_acumuladas[j],
        2)}', fontsize=8,
        verticalalignment='bottom', horizontalalignment='center')

# Añadir leyenda personalizada en el lado derecho

custom_legend = [plt.Line2D([], [], color=color, linestyle='--',
linewidth=1, label=f'{perc * 100}%') for perc, color in
zip(percentiles_interes, colores)]

fig.legend(handles=custom_legend, loc='center right')

# Ajustar el diseño

plt.tight_layout(rect=[0, 0.03, 0.9, 0.95])

plt.show()

# Crear el subplot de 2x4 para los gráficos

fig, axs = plt.subplots(2, 4, figsize=(16, 8), sharey=True, sharex=True)

fig.suptitle(f'Velocidades Máximas Acumuladas por Percentil y Mes -
{nombre_archivo_sin_numero}', fontsize=16)

# Iterar sobre los meses y crear los gráficos correspondientes

for i, (mes, nombre_mes) in enumerate(zip(meses_con_datos, nombres_meses)):
    # Filtrar los datos para el mes actual

```

```
datos_mes = datos[datos['Fecha'].dt.month == mes]

# Calcular las velocidades acumuladas para cada percentil en el mes
actual

velocidades_acumuladas = []

for percentil in percentiles_interes:

    velocidad_acumulada = datos_mes['velocidad
máxima'].quantile(percentil)

    velocidades_acumuladas.append(velocidad_acumulada)

# Interpoliar los datos para suavizar la línea

f = interp1d(percentiles_interes, velocidades_acumuladas, kind='cubic')

percentiles_interpolados = np.linspace(min(percentiles_interes),
max(percentiles_interes), 100)

velocidades_interpoladas = f(percentiles_interpolados)

# Graficar los datos en el subplot correspondiente

axs[i // 4, i % 4].plot(percentiles_interpolados,
velocidades_interpoladas, label=nombre_mes, color='blue')

axs[i // 4, i % 4].set_title(nombre_mes)

axs[i // 4, i % 4].grid(True)

axs[i // 4, i % 4].set_xlabel('Percentil')

axs[i // 4, i % 4].set_ylabel('velocidad (km/h)')

# Agregar líneas entrecortadas desde el eje x y y

for j, perc in enumerate(percentiles_interes):

    axs[i // 4, i % 4].plot([perc, perc], [60,
velocidades_acumuladas[j]], color=colores[j], linestyle='--')

    axs[i // 4, i % 4].plot([0, perc], [velocidades_acumuladas[j],
velocidades_acumuladas[j]], color=colores[j], linestyle='--')

# Agregar los valores correspondientes a los percentiles en la curva

for j, perc in enumerate(percentiles_interes):

    axs[i // 4, i % 4].plot(perc, velocidades_acumuladas[j], 'ro')
```

```
        axs[i // 4, i % 4].text(perc, velocidades_acumuladas[j],
f'{round(velocidades_acumuladas[j],          2)}',          fontsize=8,
verticalalignment='bottom', horizontalalignment='center')

# Añadir leyenda personalizada en el lado derecho

custom_legend = [plt.Line2D([], [], color=color, linestyle='--',
linewidth=1, label=f'{perc * 100}%') for perc, color in
zip(percentiles_interes, colores)]

fig.legend(handles=custom_legend, loc='center right')

# Ajustar el diseño

plt.tight_layout(rect=[0, 0.03, 0.9, 0.95])

plt.show()

# Crear el subplot de 2x4 para los gráficos de líneas con un tamaño más
grande

fig, axs = plt.subplots(2, 4, figsize=(20, 10), sharey=True)

fig.suptitle(f'Velocidades Medias por Mes - {nombre_archivo_sin_numero}',
fontsize=16) # Agregar el título al conjunto de gráficos

# Iterar sobre los meses y crear los gráficos de líneas correspondientes
for i, (mes, nombre_mes) in enumerate(zip(meses_con_datos, nombres_meses)):

    # Filtrar los datos para el mes actual

    datos_mes = datos[datos['Fecha'].dt.month == mes]

    # Graficar los datos de líneas en el subplot correspondiente

    axs[i // 4, i % 4].plot(datos_mes['Fecha'], datos_mes['Velocidad
media'], color='blue', alpha=0.5, label=nombre_mes)

    axs[i // 4, i % 4].set_title(nombre_mes)

    axs[i // 4, i % 4].grid(True)

    axs[i // 4, i % 4].set_xlabel('Fecha')

    axs[i // 4, i % 4].set_ylabel('Velocidad Media (km/h)')

    axs[i // 4, i % 4].tick_params(axis='x', rotation=45) # Rotar las
etiquetas del eje x para mejor visualización

# Ajustar el diseño y compartir el eje y

plt.tight_layout(rect=[0, 0.03, 0.9, 0.95],h_pad=2.5)
```

```
plt.subplots_adjust(wspace=0.3, hspace=0.6)

plt.show()

# Crear el subplot de 2x4 para los gráficos de líneas con un tamaño más grande

fig, axs = plt.subplots(2, 4, figsize=(20, 10), sharey=True)

fig.suptitle(f'velocidades Máximas por Mes - {nombre_archivo_sin_numero}',
fontsize=16) # Agregar el título al conjunto de gráficos

# Iterar sobre los meses y crear los gráficos de líneas correspondientes

for i, (mes, nombre_mes) in enumerate(zip(meses_con_datos, nombres_meses)):

    # Filtrar los datos para el mes actual

    datos_mes = datos[datos['Fecha'].dt.month == mes]

    # Graficar los datos de líneas en el subplot correspondiente

    axs[i // 4, i % 4].plot(datos_mes['Fecha'], datos_mes['Velocidad
máxima'], color='blue', alpha=0.5, label=nombre_mes)

    axs[i // 4, i % 4].set_title(nombre_mes)

    axs[i // 4, i % 4].grid(True)

    axs[i // 4, i % 4].set_xlabel('Fecha')

    axs[i // 4, i % 4].set_ylabel('Velocidad Máxima (km/h)')

    axs[i // 4, i % 4].tick_params(axis='x', rotation=45) # Rotar las
etiquetas del eje x para mejor visualización

# Ajustar el diseño y compartir el eje y

plt.tight_layout(rect=[0, 0.03, 0.9, 0.95],h_pad=2.5)

plt.subplots_adjust(wspace=0.3, hspace=0.6)

plt.show()
```

### **Anexo G: Código Travel Time Reliability.**

```
import pandas as pd

import matplotlib.pyplot as plt

import os

# Tabla de rangos de TTI y su correspondiente nivel de servicio
```

```
tabla_nivel_servicio = {  
    'A': (float('-inf'), 1.083),  
    'B': (1.083, 1.300),  
    'C': (1.300, 1.444),  
    'D': (1.444, 1.625),  
    'E': (1.625, 1.857),  
    'F': (1.857, float('inf'))  
}  
  
# Lista de datos para la tabla final  
datos_tabla_final = []  
  
# Lista de nombres de archivos (puedes agregar más archivos a esta lista)  
lista_archivos = [  
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y Percentiles/1.  
VISTA LINDA SUR NORTE P.xlsx",  
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y Percentiles/2. MAX  
UHLE SUR NORTE P.xlsx",  
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y Percentiles/3.  
AMARU SUR NORTE P.xlsx",  
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y Percentiles/4.  
LAGUNAS SUR NORTE P.xlsx",  
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y Percentiles/5.  
PRIMAX SUR NORTE P.xlsx",  
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y Percentiles/7.  
PUERTA DE HIERRO NORTE SUR P.xlsx",  
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y Percentiles/8. PUENTE  
MULTI NORTE SUR P.xlsx",  
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y Percentiles/9.  
LAGUNAS NORTE SUR P.xlsx",  
    "C:/Users/BOLLE/Desktop/Tesis/Velocidad de Punto y Percentiles/10.  
AMARU NORTE SUR P.xlsx",  
    # Añade más archivos aquí
```

```
]
# Iterar sobre la lista de archivos
for archivo_excel in lista_archivos:
    # Extraer el nombre del archivo sin la ruta ni la extensión
    nombre_archivo = os.path.basename(archivo_excel).rsplit('.', 1)[0]
    # Eliminar dígitos al inicio del nombre del archivo
    nombre_archivo_sin_numero = nombre_archivo.lstrip("0123456789.")
    # Eliminar la última letra "P" del nombre del archivo si existe
    if nombre_archivo_sin_numero.endswith('P'):
        nombre_archivo_sin_numero = nombre_archivo_sin_numero[:-1]
    # Leer el archivo Excel
    datos = pd.read_excel(archivo_excel)
    # Calcular el promedio de la columna "Velocidad media"
    promedio_velocidad_media = datos['velocidad media'].mean()
    print(f"Promedio de la columna 'velocidad Media' en
{nombre_archivo_sin_numero}: {round(promedio_velocidad_media, 2)} km/h")
    # Calcular el tiempo estimado de viaje con la velocidad media
    distancia_fila_1 = datos.loc[0, 'Distancia']
    tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_horas = distancia_fila_1 /
promedio_velocidad_media
    tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos =
tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_horas * 60
    print(f"Tiempo estimado de viaje con velocidad media en
{nombre_archivo_sin_numero}:
{round(tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos, 2)} minutos")
    # Calcular el tiempo estimado de viaje con el valor máximo de la
columna "velocidad máxima"
    velocidad_maxima = datos['velocidad media'].quantile(0.005)
    tiempo_estimado_viaje_velocidad_maxima_horas = distancia_fila_1 /
velocidad_maxima
```

```
tiempo_estimado_viaje_velocidad_maxima_minutos =
tiempo_estimado_viaje_velocidad_maxima_horas * 60

print(f"Tiempo estimado de viaje con velocidad máxima en
{nombre_archivo_sin_numero}:
{round(tiempo_estimado_viaje_velocidad_maxima_minutos, 2)} minutos")

# Calcular los percentiles 85 y 95 de la columna "Velocidad media"

percentil_85_velocidad_media = datos['Velocidad media'].quantile(0.85)

print(f"Percentil 85 de la columna 'Velocidad media' en
{nombre_archivo_sin_numero}: {round(percentil_85_velocidad_media, 2)}
km/h")

# Calcular el tiempo estimado de viaje con el percentil 85 de
'Velocidad media'

tiempo_estimado_viaje_percentil_85_horas = distancia_fila_1 /
percentil_85_velocidad_media

tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos =
tiempo_estimado_viaje_percentil_85_horas * 60

print(f"Tiempo estimado de viaje con percentil 85 de 'Velocidad media'
en {nombre_archivo_sin_numero}:
{round(tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos, 2)} minutos")

# Calcular el percentil 95 del tiempo de viaje

tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos = datos['Tiempo de
viaje'].quantile(0.95)

print(f"Percentil 95 del tiempo de viaje en
{nombre_archivo_sin_numero}:
{round(tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos, 2)} minutos")

# Calcular el Travel Time Index usando el tiempo estimado de viaje con
percentil 85 de 'Velocidad media'

travel_time_index = tiempo_estimado_viaje_velocidad_maxima_minutos /
tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos

print(f"Travel Time Index en {nombre_archivo_sin_numero}:
{round(travel_time_index, 2)}")

# Calcular el Buffer Index

buffer_index = (tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos -
tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos) /
tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos
```

```
print(f"Buffer Index en {nombre_archivo_sin_numero}:
{round(buffer_index, 2)}")

# Calcular el Buffer Time

buffer_time = buffer_index *
tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos

print(f"Buffer Time en {nombre_archivo_sin_numero}:
{round(buffer_time, 2)} minutos")

# Calcular el Planning Time Index

planning_time_index = tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos /
tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos

print(f"Planning Time Index en {nombre_archivo_sin_numero}:
{round(planning_time_index, 2)}")

# Calcular el Planning Time

planning_time = planning_time_index *
tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos

print(f"Planning Time en {nombre_archivo_sin_numero}:
{round(planning_time, 2)} minutos")

# Calcular el nivel de servicio según el Travel Time Index

nivel_servicio = None

for nivel, rango in tabla_nivel_servicio.items():

    if rango[0] <= travel_time_index <= rango[1]:

        nivel_servicio = nivel

        break

if nivel_servicio:

    print(f"Nivel de servicio en {nombre_archivo_sin_numero}:
{nivel_servicio}")

else:

    print(f"Nivel de servicio en {nombre_archivo_sin_numero}: No
clasificado")

# Agregar datos a la lista de la tabla final

datos_tabla_final.append({
```

```
'Radar': nombre_archivo_sin_numero,
'Travel Time Index': round(travel_time_index, 2),
'Nivel de Servicio': nivel_servicio
})

# Crear el gráfico de líneas para el tiempo de viaje
plt.figure(figsize=(10, 6))

plt.plot(datos['Fecha'], datos['Tiempo de viaje'], label='Tiempo de
viaje', color='blue', linestyle='-')

plt.axhline(y=tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos,
color='r', linestyle='-', linewidth=2, label='velocidad Media')

# Etiquetas y leyenda
plt.xlabel('Meses')
plt.ylabel('Tiempo de viaje (minutos)')
plt.legend()

# Mostrar el gráfico
plt.show()

# Crear un gráfico de barras verticales para la relación entre "Tiempo
de viaje" y "Cantidad de vehículos"

plt.figure(figsize=(10, 6))

plt.bar(datos['Tiempo de viaje'], datos['Cantidad de vehículos'],
color='mintcream', label='Cantidad de Vehículos', edgecolor='white')

# Etiquetas y título
plt.xlabel('Tiempo de viaje (minutos)')
plt.ylabel('Cantidad de vehículos')
plt.title(f'Distribución de Tiempo de Viaje')

# Trazar líneas verticales en los tiempos específicos y agregar los
valores de tiempo a la mitad del gráfico

# Tiempo estimado de viaje con velocidad media

plt.axvline(x=tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos,
color='r', linestyle='--', label='Tiempo promedio de viaje')
```

```
plt.text(tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos, plt.ylim()[1]
* 0.5, f"{tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos:.2f} min",
ha='right', va='center', color='r')

# Tiempo estimado de viaje con percentil 85 de velocidad media

plt.axvline(x=tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos, color='b',
linestyle='--', label='Tiempo de viaje de flujo libre')

plt.text(tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos, plt.ylim()[1] *
0.5, f"{tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos:.2f} min", ha='right',
va='center', color='b')

# Percentil 95 del tiempo de viaje

plt.axvline(x=tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos, color='g',
linestyle='--', label='Percentil 95 del tiempo de viaje')

plt.text(tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos, plt.ylim()[1] *
0.5, f"{tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos:.2f} min", ha='right',
va='center', color='g')

# Calcular el margen adicional para los límites del eje x

margen_x = (tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos -
tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos) * 0.1

# Establecer los límites del eje x con margen adicional

plt.xlim(tiempo_estimado_viaje_percentil_85_minutos - margen_x,
tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos + margen_x)

# Añadir una flecha bidireccional entre las líneas verticales de
velocidad media y percentil 95

plt.annotate(
    '',
    xy=(tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos, plt.ylim()[1] *
0.4),
    xytext=(tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos, plt.ylim()[1]
* 0.4),
    arrowprops=dict(
        arrowstyle='<->',
        color='black',
        lw=1.5,
```

```
    ),  
    )  
    # Añadir texto encima de la flecha bidireccional para el buffer time  
    plt.annotate(  
        f"Buffer time: {buffer_time:.2f} min",  
        xy=(tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos +  
(tiempo_estimado_viaje_percentil_95_minutos -  
tiempo_estimado_viaje_velocidad_media_minutos) / 2, plt.ylim()[1] * 0.45),  
        ha='center',  
        va='bottom',  
        fontsize=10,  
        color='black'  
    )  
    # Añadir una leyenda para identificar las líneas verticales y la serie  
de datos  
    plt.legend()  
    # Mostrar el gráfico  
    plt.show()  
plt.show()  
# Crear DataFrame a partir de la lista de datos  
tabla_final = pd.DataFrame(datos_tabla_final)  
  
# Mostrar la tabla final  
print("Tabla Final:")  
print(tabla_final)
```