



POSGRADOS

Maestría en

Vialidad y

Transporte

RPC-SO-05-No.087-2024

Opción de Titulación:

Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

Tema:

Propuesta de implementación de una Turbo Rotonda en el Sector Tres Puentes de la ciudad de Cuenca, Ecuador

Autores:

Sophia Micaela Lituma AVECILLAS
Anthony Leonardo Zumba Cabrera

Director:

Víctor Fernando Pinos Mata

CUENCA – Ecuador

2026

Autores:



Sophia Micaela Lituma Vecillas

Ingeniera Civil

Candidato a Magíster en VIALIDAD Y TRANSPORTE por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Guayaquil.

slitumaa1@est.ups.edu.ec



Anthony Leonardo Zumba Cabrera

Ingeniero Civil

Candidato a Magíster en VIALIDAD Y TRANSPORTE por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

azumbac@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Víctor Fernando Pinos Mata

Ingeniero Civil

Magister en tránsito, transporte y seguridad vial

Universidad Politécnica Salesiana

vpinos@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2026 © Universidad Politécnica Salesiana.

GUAYAQUIL– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Sophia Micaela Lituma Vecillas

Anthony Leonardo Zumba Cabrera

Propuesta de implementación de una Turbo Rotonda en el Sector Tres Puentes de la ciudad de Cuenca, Ecuador

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de titulación a nuestras familias, por ser nuestro mayor apoyo e inspiración a lo largo de este proceso académico. Gracias por su amor incondicional, paciencia y confianza constante, y por motivarnos día a día a superarnos y a buscar el crecimiento personal y profesional. Este logro es también fruto de su esfuerzo y acompañamiento.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios por brindarnos la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para cumplir este importante objetivo profesional, guiándonos en cada etapa de nuestra formación.

De igual manera, expresamos nuestro sincero agradecimiento a nuestro tutor, por su valiosa guía, dedicación y apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos, orientación y compromiso fueron fundamentales para la culminación exitosa del presente proyecto académico.

Tabla de Contenido

Resumen	8
Abstract.....	9
1. Introducción.....	10
1.1. Justificación del estudio	11
2. Objetivos	12
2.1. Objetivo General	12
2.2. Objetivos Específicos.....	12
3. Determinación del Problema	14
4. Marco teórico.....	16
4.1. Intersecciones viales	16
4.1.1. Tipos de intersecciones.....	16
4.1.2. Intersecciones a nivel.....	18
4.2. Capacidad, demanda y nivel de servicio	19
4.2.1. Demanda vehicular	19
4.2.2. Capacidad.....	20
4.2.3. Relación volumen–capacidad	21
4.2.4. Nivel de servicio	21
4.2.5. Longitud de cola en intersecciones no semaforizadas	22
4.3. Rotondas	24
4.3.1. Principios de operación de las rotondas.....	24
4.3.2. Capacidad y demoras en accesos de las rotondas.....	25
4.3.3. Longitud de cola en rotondas	26
4.3.4. Componentes geométricos principales de las rotondas	26
4.3.5. Limitaciones de las rotondas convencionales en entornos urbanos.....	27
4.4. Turbo rotondas.....	28
4.4.1. Definición, origen e importancia	28
4.4.2. Tipos de turbo rotondas y sus particularidades	29
4.4.3. Diseño geométrico de las turbo rotondas	31
4.5. Señalización y canalización en turbo rotondas	35

4.5.1.	Principios generales de señalización en turbo rotondas	36
4.6.	Seguridad vial en turbo rotondas.....	37
4.6.1.	Puntos de conflicto	38
4.6.2.	Relación entre geometría, velocidad y severidad de los accidentes	40
4.7.	Microsimulación de tráfico	41
4.7.1.	Software Aimsun.....	42
5.	Metodología.....	43
5.1.	Zona de estudio.....	43
5.2.	Levantamiento de información	44
5.2.1.	Geometría actual	44
5.2.2.	Composición vehicular	45
5.3.	Escenarios de análisis	47
5.3.1.	Escenario actual y futuro	47
5.4.	Parámetros geométricos del diseño propuesto.....	49
5.4.1.	Vehículo de diseño.....	49
5.4.2.	Turbo bloque.....	51
5.4.3.	Otros elementos de la Turbo Ronda	55
5.4.4.	Verificación geométrica del modelo.....	60
6.	Resultados y discusión	62
6.1.	Validación del modelo de microsimulación	62
6.2.	Diagnóstico operacional de la rotonda del estado actual	63
6.3.	Evaluación del modelo propuesto con turbo rotonda para el tráfico actual ..	65
6.4.	Evaluación del modelo propuesto con turbo rotonda para el tráfico proyectado	68
6.5.	Análisis comparativo integral de los escenarios	70
7.	Conclusiones	72

Propuesta de implementación de una Turbo Rotonda en el Sector Tres Puentes de la ciudad de Cuenca, Ecuador

Autores:

SOPHIA MICAELA LITUMA AVECILLAS

ANTHONY LEONARDO ZUMBA CABRERA

Resumen

El crecimiento del parque automotor en la ciudad de Cuenca ha generado una creciente presión sobre la infraestructura vial urbana, especialmente en intersecciones estratégicas con altos volúmenes de tránsito. El sector Tres Puentes constituye uno de los nodos más complejos de la red vial, al concentrar seis accesos principales y operar mediante una rotonda convencional multicarril que presenta deficiencias operativas y de seguridad vial, evidenciadas en elevados tiempos de demora, colas prolongadas y un nivel de servicio deficiente durante la hora pico.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica de implementar una turbo rotonda en el sector Tres Puentes como alternativa para mejorar la operación del tránsito y la seguridad vial. Para ello, se realizó el levantamiento y análisis de información de tráfico, así como la modelación de escenarios mediante microsimulación utilizando el software Aimsun. El modelo fue calibrado y validado con datos reales, garantizando una representación confiable de las condiciones actuales y futuras de operación de la intersección.

Los resultados obtenidos muestran que la rotonda existente presenta una demora promedio de 73 s, correspondiente a un nivel de servicio F, mientras que la implementación de la turbo rotonda reduce la demora promedio a 34 s, mejorando el nivel de servicio a D bajo condiciones actuales. Asimismo, el análisis del escenario futuro evidencia que la intersección mantiene un desempeño operativo comparable al actual, pero con una demanda vehicular significativamente mayor. En consecuencia, se concluye que la turbo rotonda constituye una solución técnicamente viable para mejorar la eficiencia operativa y la seguridad vial en el sector Tres Puentes de la ciudad de Cuenca.

Palabras clave:

turbo rotonda, microsimulación de tráfico, nivel de servicio, congestión vehicular, seguridad vial.

Abstract

The sustained growth of the vehicle fleet in the city of Cuenca has increased the pressure on urban road infrastructure, particularly at strategic intersections with high traffic volumes. The Tres Puentes area represents one of the most complex nodes in the urban road network, as it concentrates six main approaches and operates with a conventional multilane roundabout that exhibits operational and road safety deficiencies, reflected in high delays, long queues, and poor levels of service during peak hours.

This study aims to evaluate the technical feasibility of implementing a turbo roundabout at the Tres Puentes intersection as an alternative to improve traffic operation and road safety. Traffic data collection and analysis were conducted, and different scenarios were evaluated through traffic microsimulation using Aimsun software. The model was calibrated and validated with field data, ensuring a reliable representation of current and future traffic conditions.

The results indicate that the existing roundabout operates with an average delay of 73 s, corresponding to a Level of Service F, while the proposed turbo roundabout reduces the average delay to 34 s, improving the Level of Service to D under current conditions. Additionally, the future scenario analysis shows that the intersection maintains similar operational performance despite a significant increase in traffic demand. Therefore, the implementation of a turbo roundabout is considered a technically viable solution to enhance operational efficiency and road safety at the Tres Puentes intersection in Cuenca.

Palabras clave:

turbo roundabout, traffic microsimulation, level of service, traffic congestion, road safety.

1. Introducción

En las últimas décadas, el crecimiento del parque automotor ha incrementado de manera considerable la presión sobre los sistemas viales urbanos. Este fenómeno se manifiesta con mayor claridad en ciudades de tamaño intermedio como Cuenca, donde la expansión urbana y la capacidad limitada de muchas intersecciones han contribuido a un aumento progresivo de la congestión vehicular. Como consecuencia, se observan pérdidas de eficiencia en la operación del sistema vial y mayores riesgos para la seguridad de los usuarios (SWOV Institute for Road Safety Research, 2022).

En respuesta a estas limitaciones, diversas ciudades alrededor del mundo han explorado soluciones innovadoras en el diseño de intersecciones, entre las cuales destacan las turbo rotondas. Este tipo de rotonda fue desarrollada inicialmente en los Países Bajos como una alternativa a las rotondas convencionales, combinando la capacidad operativa de las rotondas de dos carriles con características de seguridad similares a las de un solo carril. Su principal rasgo es la canalización física mediante separadores que impiden cambios bruscos de carril dentro de la intersección, lo que permite ordenar los movimientos vehiculares y reducir situaciones de conflicto durante la circulación (Fortuijn, 2009a).

Los beneficios de las turbo rotondas han sido analizados en diversos estudios realizados en países europeos. En los Países Bajos, entre los años 2000 y 2009, se construyeron aproximadamente 70 turbo rotondas como alternativa a las rotondas multicarril convencionales, observándose mejoras relevantes en términos de seguridad vial y capacidad de tráfico (Fortuijn, 2009a). De manera similar, países como Eslovenia, Alemania, Croacia y Polonia han implementado esta solución, reportando resultados positivos en la reducción de accidentes y en la optimización del flujo vehicular (Džambas et al., 2017a).

En Ecuador, la ciudad de Quito presentó en 2019 la primera propuesta formal de implementación de una turbo rotonda en la intersección de la avenida Machala y la calle Rigoberto

Heredia, con el objetivo de reducir la accidentalidad y mejorar el nivel de servicio vial (Quito Informa, 2019). En la ciudad de Cuenca, particularmente en el sector Tres Puentes, la situación actual se caracteriza por la presencia de una rotonda convencional que presenta deficiencias de visibilidad y una elevada accidentalidad, asociadas a su limitada capacidad para gestionar eficientemente el alto volumen vehicular, lo que genera congestionamientos frecuentes (Francisco et al., 2023).

1.1. Justificación del estudio

Diversos estudios realizados en contextos urbanos comparables han señalado que las turbo rotondas pueden funcionar como una alternativa viable frente a las rotondas convencionales. La separación física de carriles facilita la organización de los movimientos vehiculares y contribuye a un mejor desempeño del flujo de tránsito en intersecciones con alta demanda, reduciendo conflictos asociados a cambios de carril y maniobras de entrecruzamiento (Corriere y Guerrieri, 2012).

Desde una perspectiva ambiental, investigaciones recientes han analizado la implementación de turbo rotondas, especialmente en escenarios urbanos con congestión recurrente. La reducción de frenadas y aceleraciones repetitivas, en comparación con rotondas convencionales de varios carriles, contribuye a disminuir las emisiones de gases contaminantes, aspecto especialmente relevante en ciudades que presentan problemas de congestión vehicular (Gallelli et al., 2021).

En la ciudad de Cuenca, el crecimiento poblacional y el aumento del parque automotor han intensificado los problemas de movilidad urbana, particularmente en intersecciones estratégicas donde confluyen altos volúmenes de tránsito. La congestión vehicular que se observa en estos puntos incrementa el riesgo de accidentes y afecta directamente la calidad de vida de los ciudadanos, lo que evidencia la necesidad de implementar soluciones que mejoren la operación del tránsito y la seguridad vial.

En este contexto, la aplicación de turbo rotondas en Cuenca se presenta como una alternativa técnica para abordar los problemas de congestión y seguridad en intersecciones urbanas complejas. Estudios comparativos señalan que este tipo de diseño puede mejorar el flujo vehicular y reducir la frecuencia de conflictos en relación con las rotondas convencionales, siempre que se adapte adecuadamente a las condiciones locales de tráfico y de entorno urbano (Mauro et al., 2015).

Asimismo, la implementación de turbo rotondas resulta pertinente considerando las limitaciones de espacio propias del entorno urbano de Cuenca y la diversidad de patrones de movilidad que presenta la ciudad. La posibilidad de optimizar la capacidad de las intersecciones sin realizar grandes ampliaciones de infraestructura constituye una ventaja importante en contextos urbanos consolidados.

Por lo tanto, el presente estudio se justifica en la necesidad de evaluar la viabilidad de implementar una turbo rotonda en el sector Tres Puentes de Cuenca, con el fin de proponer una solución de infraestructura que responda a las necesidades de movilidad y seguridad vial del sector, tomando como referencia experiencias exitosas documentadas en otros contextos urbanos.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Diseñar una propuesta de una turbo rotonda en el sector Tres Puentes como una solución a la congestión vehicular y problemática de seguridad vial de la zona basados en las propuestas de diseño disponibles en la literatura.

2.2. Objetivos Específicos

- Establecer el estado del arte mediante la revisión de la literatura existente sobre turbo rotondas, enfocada en su diseño, seguridad y capacidad, a fin de evaluar y elegir la metodología de diseño que mejor se adapte a nuestro medio.

- Analizar la situación de la intersección seleccionada mediante recopilación de datos de tráfico, flujo y seguridad vial a fin de conocer su estado actual y futuro.
- Modelar escenarios de tráfico mediante software de modelación de microsimulación para evaluar el impacto de la implementación de una turbo rotonda.
- Diseñar un plan de implementación de turbo rotonda adaptado al contexto urbano de Cuenca identificando los beneficios potenciales en términos de seguridad, funcionalidad e impacto ambiental con el fin de brindar una solución a la congestión vehicular y problemática de seguridad vial de la zona.

3. Determinación del Problema

La ciudad de Cuenca enfrenta un desafío creciente en materia de movilidad debido al incremento sostenido del parque automotor y a una infraestructura vial que no ha evolucionado al mismo ritmo. Esta situación ha generado una saturación progresiva de intersecciones estratégicas de la red vial urbana, afectando la fluidez del tránsito y aumentando los riesgos asociados a la seguridad vial.

En la ciudad de Cuenca, el sector conocido como Tres Puentes constituye uno de los nodos más complejos de la red vial urbana, al concentrar múltiples accesos que conectan zonas residenciales, comerciales y ejes de circulación de alta demanda. La intersección opera actualmente mediante una rotonda convencional multicarril, cuya configuración geométrica no canaliza de forma clara las trayectorias vehiculares, lo que dificulta la operación del tránsito en los periodos de mayor flujo.

El diseño actual de la rotonda favorece la aparición de maniobras de entrecruzamiento y cambios bruscos de carril dentro del anillo circulatorio, incrementando los puntos de conflicto entre vehículos. Estas condiciones se ven agravadas por limitaciones de visibilidad asociadas a elementos ubicados en la isleta central, lo que reduce la capacidad de anticipación de los conductores y eleva el riesgo de incidentes, particularmente en situaciones de congestión.

Como consecuencia de estas deficiencias, se registran colas prolongadas, tiempos de espera elevados y una evidente disminución de la calidad del servicio de la intersección, afectando la movilidad no solo en el entorno inmediato, sino también en corredores viales adyacentes. Este comportamiento es característico de rotondas convencionales multicarril que operan bajo demandas cercanas o superiores a su capacidad (Mauro et al., 2015).

En contextos de alta demanda, las rotondas multicarril presentan mayores niveles de conflicto interno en comparación con configuraciones que incorporan segregación física de carriles y definición anticipada de trayectorias. En este sentido, investigaciones previas han evidenciado que las turbo

rotondas permiten mejorar el ordenamiento de los flujos vehiculares y reducir los puntos de conflicto mediante la canalización de movimientos, lo que se traduce en mejoras en la seguridad vial y en el desempeño operativo de la intersección (Corriere y Guerrieri, 2012).

Asimismo, estudios más recientes destacan que este tipo de intersecciones puede contribuir a una utilización más eficiente de la infraestructura existente, al reducir las detenciones y maniobras innecesarias dentro del nodo, siempre que el diseño se adapte adecuadamente a las condiciones locales de tráfico y al entorno urbano (Gallelli et al., 2021).

En el caso de Tres Puentes, la combinación de una geometría poco canalizada, altos volúmenes de tránsito y un entorno urbano con restricciones espaciales evidencia que la rotonda actual no responde de manera adecuada a las necesidades operativas presentes ni a las proyecciones de crecimiento futuro. De mantenerse la configuración existente, es previsible que los problemas de congestión y los conflictos vehiculares se intensifiquen, afectando la eficiencia del sistema vial y la seguridad de sus usuarios.

En este contexto, el problema central que aborda la presente investigación se relaciona con la ineficiencia operativa y los riesgos de seguridad vial asociados a la rotonda convencional del sector Tres Puentes, derivados de una configuración geométrica que no se ajusta a las condiciones actuales de demanda. La evaluación de una propuesta de implementación de una turbo rotonda se plantea como una alternativa técnica orientada a mejorar la capacidad de la intersección, reducir los conflictos de circulación y contribuir a una movilidad urbana más segura y eficiente en la ciudad de Cuenca.

4. Marco teórico

4.1. Intersecciones viales

Las intersecciones viales constituyen puntos fundamentales dentro de una red de transporte, ya que representan los lugares donde los flujos vehiculares se cruzan, convergen o divergen. Como consecuencia de esta interacción, las intersecciones concentran una proporción significativa de los conflictos de tránsito, lo que las convierte en elementos críticos desde el punto de vista de la seguridad vial.

El desempeño de una intersección depende, en gran medida, de su tipo, de su configuración geométrica y del sistema de control de tránsito implementado. Diferentes tipos de intersecciones generan distintos números y tipos de puntos de conflicto, lo que influye directamente tanto en la probabilidad de ocurrencia de siniestros viales como en su severidad. Por esta razón, la correcta identificación y clasificación de las intersecciones resulta esencial para el análisis de la seguridad y la operación del tránsito (SWOV, 2022).

Desde el punto de vista operacional, el análisis de intersecciones se apoya en indicadores que permiten evaluar su funcionamiento bajo diversas condiciones de demanda. Entre los principales parámetros se encuentran los volúmenes de tránsito, la capacidad, el retardo promedio, la longitud de cola y la relación volumen–capacidad. Estos indicadores constituyen la base para la determinación del nivel de servicio, el cual es ampliamente utilizado como medida sintética del desempeño de las intersecciones (Transportation Research Board, 2000).

4.1.1. Tipos de intersecciones

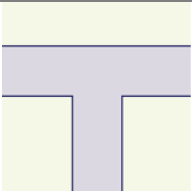
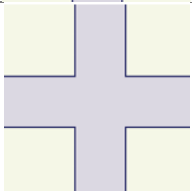
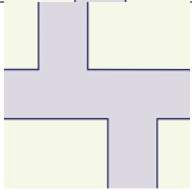
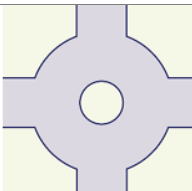
De acuerdo con la clasificación propuesta por el SWOV (2022), las intersecciones pueden agruparse en dos categorías principales: intersecciones a nivel e intersecciones a desnivel. Esta

clasificación se basa en la forma en que los flujos vehiculares interactúan entre sí y en la disposición geométrica de los movimientos.

Intersecciones a nivel: son aquellas en las que los flujos de tránsito se relacionan dentro de un mismo plano, generando puntos de cruce, convergencia y divergencia. Dentro de esta categoría se identifican diversos tipos de intersecciones, mismos que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Tipos de intersecciones

Tipo de intersección		Descripción general
	Intersección en T	Intersección a nivel con tres ramales, donde uno de los flujos termina en otro.
	Intersección en cruz	Intersección a nivel con cuatro ramales que se cruzan en un mismo plano.
	Intersección desfasada	Intersección a nivel donde los ramales no se enfrentan directamente, reduciendo conflictos.
	Rotonda	Intersección a nivel con circulación alrededor de una isla central, con prioridad para los vehículos circulantes.

Nota. Adaptado de SWOV (2022).

Intersecciones a desnivel: separan los movimientos vehiculares mediante estructuras elevadas o deprimidas, con el objetivo de eliminar los cruces directos entre flujos. Dentro de este grupo se encuentran, entre otros, los intercambiadores tipo trébol, diamante y sus variantes.

4.1.2. Intersecciones a nivel

Las intersecciones a nivel se caracterizan por la interacción directa de los flujos vehiculares dentro de un mismo plano, lo que da lugar a distintos tipos de conflictos entre movimientos. Este tipo de intersección es ampliamente utilizado debido a su menor costo de implementación y a su facilidad de adaptación a entornos urbanos consolidados; sin embargo, también presenta mayores desafíos en términos de seguridad y operación en comparación con las intersecciones a desnivel.

El Highway Capacity Manual clasifica las intersecciones a nivel en función del tipo de control de tránsito, distinguiendo principalmente entre intersecciones no semaforizadas e intersecciones semaforizadas.

Las intersecciones semaforizadas regulan el tránsito mediante fases alternas controladas por dispositivos electrónicos, lo que permite distribuir el derecho de paso entre las diferentes aproximaciones de forma ordenada. Este tipo de control resulta particularmente adecuado bajo condiciones de altos volúmenes de tránsito; sin embargo, una programación inadecuada de los tiempos semaforicos puede generar incrementos significativos en el retardo y en la longitud de las colas (Transportation Research Board, 2000).

Por otro lado, las intersecciones controladas mediante señalización vertical asignan prioridad a una vía sobre otra, lo cual puede resultar eficiente bajo volúmenes bajos a moderados. No obstante, cuando los flujos vehiculares se incrementan, este tipo de control tiende a presentar limitaciones operacionales, manifestadas principalmente en mayores demoras para los movimientos subordinados (Transportation Research Board, 2000).

Las intersecciones sin control específico dependen del cumplimiento de las normas de tránsito y del juicio del conductor para la aceptación de brechas, lo que puede incrementar la probabilidad de conflictos y reducir la eficiencia operativa en comparación con intersecciones con control formal, especialmente bajo condiciones de alta demanda.

Entre las variables más relevantes para el análisis operacional de estas intersecciones, el Highway Capacity Manual identifica el volumen vehicular (veh/h), la capacidad (veh/h), el retardo promedio por vehículo (s/veh), la longitud de cola, la relación volumen–capacidad (v/c) y el nivel de servicio (LOS). Estas variables permiten estimar el grado de saturación del sistema y evaluar la calidad de circulación experimentada por los usuarios (Transportation Research Board, 2000)

Desde el punto de vista del control del tránsito, las intersecciones a nivel pueden clasificarse en intersecciones no controladas, intersecciones controladas mediante señalización o semáforos y rotondas. Estudios indican que las rotondas presentan ventajas en términos de seguridad, asociadas principalmente a la reducción del número y la severidad de los conflictos, así como a menores velocidades de circulación en el área de cruce (SWOV, 2022). Asimismo, investigaciones sobre el diseño y operación de rotondas modernas destacan su potencial para mejorar el desempeño y la seguridad de las intersecciones a nivel cuando se aplican criterios geométricos adecuados (Tollazzi, 2015).

4.2. Capacidad, demanda y nivel de servicio

El análisis del desempeño operacional de una intersección vial se fundamenta en la relación existente entre la demanda vehicular y la capacidad disponible para atenderla. Estas dos variables constituyen la base para la evaluación de las condiciones de operación del tránsito y permiten estimar indicadores fundamentales como el retardo promedio, la longitud de cola y el nivel de servicio.

4.2.1. Demanda vehicular

La demanda vehicular se define como el número de vehículos que desean utilizar una intersección durante un intervalo de tiempo determinado, generalmente expresado en vehículos por hora (veh/h). Para efectos del análisis de capacidad, el Highway Capacity Manual señala que los volúmenes de tránsito deben corresponder a períodos representativos, tales como la hora pico, y ajustarse cuando sea necesario para reflejar adecuadamente las condiciones reales de circulación.

En el análisis de intersecciones a nivel, la demanda se determina de manera individual para cada movimiento vehicular, considerando giros a la izquierda, giros a la derecha y movimientos directos. Esta desagregación resulta necesaria debido a que cada movimiento genera diferentes impactos sobre la operación de la intersección y sobre la utilización de la capacidad disponible (Transportation Research Board, 2000)

4.2.2. Capacidad

La capacidad se define como el máximo volumen de tránsito que puede ser atendido por una intersección durante un intervalo de tiempo determinado, bajo condiciones predominantes de infraestructura, control y circulación.

En las intersecciones no semaforizadas, la estimación de la capacidad se basa en la teoría de aceptación de brechas, la cual considera que los movimientos subordinados solo pueden realizarse cuando se dispone de brechas adecuadas en los flujos prioritarios. En este contexto, la capacidad de un movimiento subordinado depende fundamentalmente del volumen del flujo conflictivo y de los parámetros de comportamiento del conductor, particularmente la brecha crítica aceptada. La relación general para el cálculo de la capacidad se expresa mediante la siguiente expresión:

$$c = \frac{3600}{t_c} \cdot e^{-\left(\frac{vc \cdot t_c}{3600}\right)}$$

donde:

- c = capacidad del movimiento,
- t_c = brecha crítica aceptada, intervalo mínimo de tiempo, en segundos, que un conductor requiere para incorporarse de manera segura al flujo circulante (s),
- v_c = volumen del flujo que prioritario que entra en el conflicto (veh/h),

4.2.3. Relación volumen–capacidad

La relación volumen–capacidad (v/c) es un indicador que expresa el grado de utilización de la capacidad disponible en una intersección. Este parámetro se obtiene como el cociente entre el volumen de demanda y la capacidad estimada para un movimiento, carril o grupo de carriles.

Valores bajos de la relación v/c indican condiciones de operación holgadas, mientras que valores cercanos o superiores a la unidad reflejan condiciones de saturación o sobrecarga, las cuales suelen asociarse con incrementos significativos en el retardo y en la longitud de cola. El Highway Capacity Manual emplea este indicador como complemento en la evaluación del desempeño operacional de intersecciones a nivel (Transportation Research Board, 2000).

4.2.4. Nivel de servicio

El nivel de servicio (LOS, por sus siglas en inglés) es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de una intersección desde la perspectiva del usuario. El Highway Capacity Manual define seis niveles de servicio, identificados con desde la letra A a la F, donde el nivel A representa condiciones de operación excelentes y el nivel F corresponde a condiciones de operación forzadas o de congestión extrema.

En intersecciones no semaforizadas, el nivel de servicio se determina principalmente en función del retardo promedio de control por vehículo, el cual integra los efectos de la demanda, la capacidad y el sistema de control aplicado. La Tabla 2 presenta los rangos de retardo asociados a cada nivel de servicio para intersecciones semaforizadas, misma que se presenta a continuación.

Tabla 2

Nivel de servicio para intersecciones no semaforizadas

Nivel de servicio	Retardo promedio (s/veh)
A	≤ 10
B	$> 10 - 15$
C	$> 15 - 25$
D	$> 25 - 35$
E	$> 35 - 50$
F	> 50

Nota. Adaptado de Transportation Research Board (2000).

El análisis de la capacidad y del nivel de servicio permite evaluar de manera integral el desempeño operacional de una intersección, facilitando la identificación de condiciones de operación deficientes y la comparación entre distintas alternativas de diseño o control del tránsito. Estos indicadores constituyen herramientas fundamentales en estudios de planificación y diseño vial, ya que permiten sustentar técnicamente la implementación de medidas orientadas a mejorar la seguridad y la eficiencia del sistema de transporte.

4.2.5. Longitud de cola en intersecciones no semaforizadas

La longitud de cola constituye un indicador fundamental del desempeño operacional de una intersección, que representa la acumulación espacial de vehículos que esperan para completar un movimiento debido a restricciones de capacidad o control. Este parámetro es especialmente relevante para la evaluación de intersecciones a nivel, dado que colas excesivas pueden generar bloqueos aguas arriba, interferencias con accesos adyacentes y un deterioro significativo de la seguridad y la eficiencia del tránsito.

En intersecciones no semaforizadas, las colas se generan cuando la demanda de los movimientos subordinados se aproxima o supera la capacidad disponible, impidiendo que los vehículos encuentren brechas suficientes en los flujos prioritarios. Bajo estas condiciones, los vehículos se acumulan progresivamente en los accesos, incrementando tanto el retardo como la longitud de cola.

El Highway Capacity Manual señala que la longitud de cola en intersecciones no semaforizadas presenta una alta variabilidad temporal, especialmente bajo condiciones cercanas a la saturación. Por esta razón, el análisis debe considerar no solo valores promedio, sino también colas máximas asociadas a un determinado nivel de probabilidad, con el fin de evaluar adecuadamente las necesidades de almacenamiento en los accesos (Transportation Research Board, 2000).

Las rotondas se analizan como una forma particular de intersección no semaforizada, en la cual los vehículos que ingresan deben ceder el paso al flujo circulante. En este contexto, la longitud de cola se evalúa de manera independiente para cada acceso, considerando que cada entrada funciona como un movimiento subordinado frente al flujo prioritario del anillo circulatorio.

La longitud de cola en los accesos a una rotonda depende principalmente del volumen del flujo circulante conflictivo, de la capacidad de entrada y de la demanda del acceso. Cuando la demanda de entrada se aproxima a la capacidad, se produce un crecimiento significativo de la cola, lo que puede afectar no solo el acceso analizado, sino también la operación interna de la rotonda y las aproximaciones aguas arriba (Transportation Research Board, 2000).

Así también, el Highway Capacity Manual recomienda evaluar la cola máxima, como criterio de diseño para verificar que la capacidad en los accesos sea suficiente bajo condiciones representativas de operación. Esta recomendación resulta especialmente relevante en entornos urbanos, donde el espacio disponible es limitado y las colas pueden interferir con intersecciones o accesos cercanos.

La estimación adecuada de la longitud de cola constituye un aspecto clave en el análisis y diseño de rotondas y, en particular, de turbo rotondas, donde la canalización de carriles y la asignación anticipada de trayectorias reducen la flexibilidad de maniobra de los conductores. En este tipo de intersecciones, colas excesivas pueden generar bloqueos en los accesos, interferencias con carriles adyacentes y una degradación significativa del desempeño operacional.

4.3. Rotondas

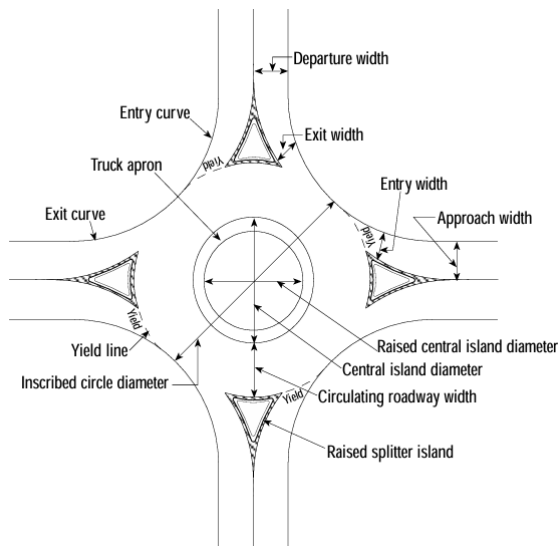
Las rotondas son intersecciones a nivel no semaforizadas caracterizadas por la circulación continua de los vehículos alrededor de una isla central y por la asignación de prioridad al flujo circulante frente a los movimientos de entrada. Este esquema operativo modifica la forma en que se producen las interacciones vehiculares, sustituyendo los conflictos de cruce directo por maniobras de convergencia y divergencia, lo que tiene implicaciones relevantes tanto en la seguridad vial como en el desempeño operacional.

Las rotondas se consideran como un caso particular de intersección no semaforizada, en la que se aplican los principios de aceptación de brechas para la estimación de la capacidad, el retardo, la longitud de cola y el nivel de servicio en cada uno de los accesos (Transportation Research Board, 2000).

Principios de operación de las rotondas

El funcionamiento de una rotonda se basa en la interacción entre el flujo circulante y los flujos de entrada provenientes de las aproximaciones. Los vehículos que ingresan a la intersección deben ceder el paso al tránsito que circula por el anillo, lo que implica que la capacidad de cada acceso depende fundamentalmente del volumen del flujo circulante conflictivo y del comportamiento de los conductores en la aceptación de brechas adecuadas.

El análisis de la operación de las rotondas debe realizarse de manera individual para cada acceso, considerando variables como la demanda, la capacidad de entrada, el retardo promedio, la longitud de cola y el nivel de servicio. El nivel de servicio global de la rotonda se determina a partir del acceso que presenta las condiciones operacionales más desfavorables (Transportation Research Board, 2000). La geometría típica de una rotonda se muestra en la Figura 1.

Figura 1*Geometría de una rotonda convencional*

Nota. Tomado de Transportation Research Board (2000).

4.3.1. Capacidad y demoras en accesos de las rotondas

La capacidad de un acceso a una rotonda se encuentra directamente condicionada por el volumen del flujo circulante que entra en conflicto con el movimiento de entrada. A medida que el flujo circulante aumenta, la disponibilidad de brechas aceptables disminuye, lo que se traduce en una reducción de la capacidad de entrada y en un incremento del retardo promedio experimentado por los vehículos.

La relación entre flujo circulante y capacidad de entrada convierte a las rotondas en intersecciones particularmente sensibles a desequilibrios en la distribución de la demanda entre accesos. Bajo condiciones cercanas a la saturación, pequeñas variaciones en el volumen circulante pueden provocar deterioros significativos en el desempeño operacional (Transportation Research Board, 2000).

4.3.2. Longitud de cola en rotondas

La longitud de cola en una rotonda es la acumulación de vehículos que esperan para ingresar al anillo circulatorio debido a la insuficiencia de brechas aceptables en el flujo prioritario. Este parámetro constituye un indicador clave para el diseño geométrico y la evaluación operativa, ya que colas excesivas pueden generar interferencias con accesos adyacentes o intersecciones cercanas.

4.3.3. Componentes geométricos principales de las rotondas

El desempeño operacional y la seguridad de una rotonda dependen en gran medida de sus características geométricas. Los componentes geométricos de una rotonda deben diseñarse de forma integrada, de modo que permitan inducir velocidades moderadas, trayectorias claras y maniobras predecibles para los conductores.

Los principales componentes geométricos de una rotonda deben definirse de forma coherente, de modo que contribuyan a un funcionamiento seguro y eficiente, especialmente en entornos urbanos donde el espacio es limitado y la demanda vehicular suele ser elevada. La Tabla 3 presenta de manera sintética los componentes geométricos más relevantes y su influencia general en la operación de la rotonda.

Tabla 3

Componentes geométricos de una rotonda

Componente geométrico	Influencia en la operación
Isla central	Controla la velocidad de circulación
Anillo circulatorio	Define la capacidad y la fluidez
Número de carriles	Incrementa capacidad y complejidad
Accesos	Condicionan el ingreso al anillo
Salidas	Influyen en la fluidez de salida
Isletas separadoras	Ordenan flujos y reducen velocidad
Ancho de entrada	Afecta la capacidad de acceso
Radio de entrada	Regula la velocidad de ingreso

Nota. Elaboración propia.

4.3.4. Limitaciones de las rotondas convencionales en entornos urbanos

Las rotondas convencionales presentan ventajas reconocidas en términos de seguridad vial al reducir los conflictos de cruce directo; sin embargo, en entornos urbanos con altos volúmenes de tránsito, su desempeño puede verse limitado por factores operacionales y geométricos. La capacidad de los accesos depende directamente del volumen del flujo circulante, por lo que, a medida que este aumenta, se reduce la disponibilidad de brechas aceptables para el ingreso de vehículos, generando incrementos significativos en las demoras y en la longitud de cola en determinados accesos (Transportation Research Board, 2000).

Una limitación relevante en rotondas convencionales, especialmente en configuraciones multicarril, es el aumento del número de puntos de conflicto asociados a maniobras de entrecruzamiento dentro del anillo circulatorio. Aunque los conflictos de cruce se eliminan, las maniobras de cambio de carril necesarias para alcanzar determinadas salidas incrementan la complejidad operativa y la probabilidad de conflictos laterales, lo que puede afectar tanto la seguridad como la fluidez del tránsito en condiciones de alta demanda (Tollazzi, 2015).

En contextos urbanos, donde suelen presentarse distribuciones direccionales desbalanceadas, uno o más accesos pueden operar cerca o por encima de su capacidad, mientras otros permanecen subutilizados. Esta condición reduce la eficiencia global de la rotonda y puede provocar congestión localizada, afectando la continuidad del tránsito y la integración con intersecciones o accesos cercanos.

Adicionalmente, la presencia de usuarios vulnerables, como peatones y ciclistas, introduce desafíos adicionales en rotondas convencionales ubicadas en áreas urbanas densas. La coexistencia de múltiples flujos vehiculares con movimientos peatonales y ciclistas incrementa la complejidad del cruce y puede afectar la percepción de seguridad, particularmente cuando las velocidades de circulación y los volúmenes vehiculares son elevados.

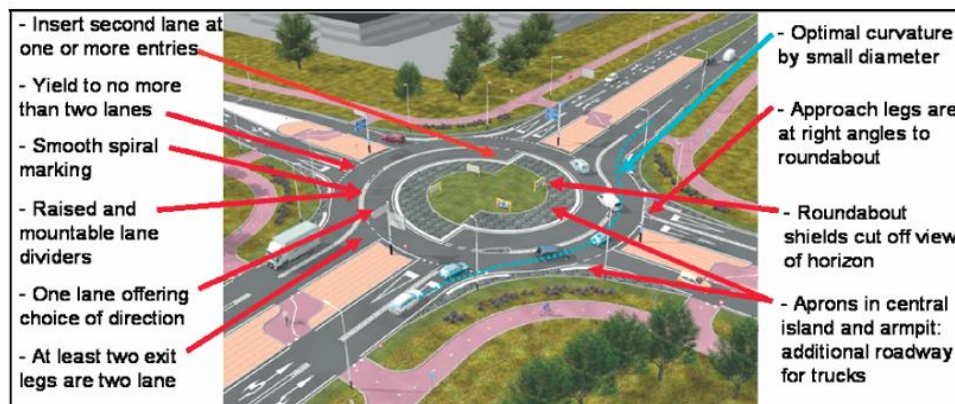
4.4. Turbo rotondas

4.4.1. Definición, origen e importancia

La turbo rotonda es un tipo de intersección giratoria de varios carriles cuyo diseño se basa en la canalización física y geométrica de los movimientos vehiculares, eliminando los cambios de carril y entrecruzamientos dentro del anillo circulatorio. A diferencia de las rotondas convencionales, la turbo rotonda obliga al conductor a seleccionar un carril determinado antes de ingresar a la intersección, guiándolo mediante carriles en espiral y separadores elevados o montables hasta la salida correspondiente como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Componentes de una Turbo rotonda



Nota. Tomado de Fortuijn (2009).

Este tipo de intersección fue desarrollado en los Países Bajos a finales de la década de 1990 por Fortuijn, como respuesta directa a los problemas de seguridad observados en las rotondas multicarril, particularmente los conflictos laterales derivados de los cambios de carril en curva y el bajo aprovechamiento del carril interior. Estudios posteriores demostraron reducciones sustanciales de accidentes con lesiones, del orden del 70–80 %, así como una mejora en la estabilidad operacional del flujo vehicular (Fortuijn, 2009a).

La importancia de la turbo rotonda radica en que logra combinar altos niveles de seguridad vial con capacidades elevadas, sin requerir incrementos significativos en el espacio ocupado. Por este motivo, su aplicación se ha extendido progresivamente en Europa y, más recientemente, en América del Norte y del Sur, respaldada por manuales técnicos y experiencias operativas documentadas (Porter et al., 2019).

4.4.2. Tipos de turbo rotondas y sus particularidades

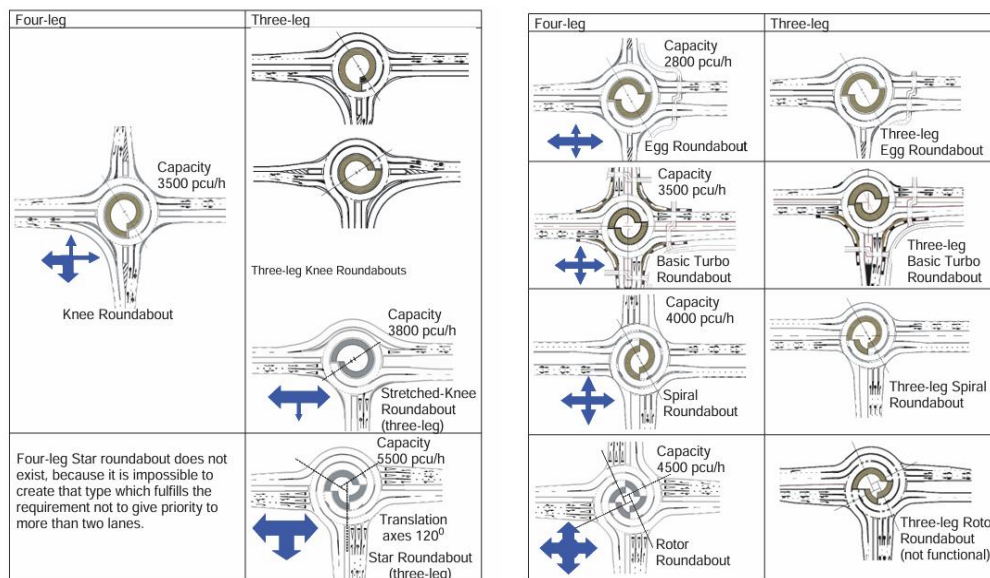
Las turbo rotondas presentan diversas clasificaciones geométricas, definidas principalmente por la forma de la isla central, la disposición de los carriles en espiral y la distribución de los flujos de tránsito. La selección de un tipo adecuado depende del equilibrio de volúmenes entre accesos, de los movimientos predominantes y de las restricciones geométricas del emplazamiento (Tollazzi, 2015).

Los principales tipos de turbo rotondas se presentan en la

Figura 3 y Tabla 4:

Figura 3

Tipos de turbo rotondas



Nota. Tomado de Fortuijn (2009a).

- Turbo rotonda básica: Es la configuración más simple y común. Presenta dos carriles en los accesos principales y una geometría en espiral moderada. Es adecuada para intersecciones con flujos relativamente equilibrados y los giros se repiten de forma regular.
- Turbo rotonda ovoide: Se caracteriza por una isla central alargada en uno de los ejes. Se usa cuando hay una vía con mucho más tráfico que las otras, ya que permite manejar mayores volúmenes sin hacer la rotonda mucho más grande.
- Turbo rotonda tipo rodilla (knee): Presenta un desplazamiento asimétrico del centro geométrico, facilitando determinados giros predominantes, generalmente giros a la izquierda en uno de los accesos.
- Turbo rotonda espiral: Incluye una transición más suave entre los carriles, con una espiral más pronunciada. Es adecuada para cruces con tráfico más complejo y varios movimientos importantes.
- Turbo rotonda tipo rotor: Es el tipo de mayor complejidad geométrica y funcional. Presenta una separación muy clara entre carriles interiores y exteriores y se emplea en intersecciones de alta demanda.

Tabla 4

Tipos de turbo rotondas y aplicaciones típicas

Tipo de turbo rotonda	Característica principal	Aplicación recomendada
Básica	Espiral simple y clara	Flujos balanceados
Ovoide	Isla central alargada	Eje dominante de tráfico
Rodilla (knee)	Desplazamiento asimétrico	Giros predominantes
Espiral	Transición progresiva de carriles	Demanda compleja
Rotor	Alta separación funcional	Volúmenes muy elevados

Nota. Elaboración propia

4.4.3. Diseño geométrico de las turbo rotondas

El diseño geométrico de una turbo rotonda se fundamenta en el concepto del turbo bloque, que define la geometría del anillo circulatorio mediante una combinación de radios y desplazamientos de centros que generan trayectorias en espiral. Los parámetros geométricos deben seleccionarse de forma coherente para garantizar el control de velocidad, la seguridad vial y el tránsito de vehículos pesados.

Los principales parámetros que intervienen en el diseño geométrico de una turbo rotonda son los siguientes:

- **Radio interior del carril interior (R1):**

El radio interior del carril interior (R1) es el parámetro geométrico más influyente sobre la velocidad de circulación dentro del anillo. Valores reducidos de R1 inducen trayectorias más cerradas y, por tanto, velocidades de operación más bajas. La experiencia europea indica que radios interiores comprendidos entre 10,5 m y 12 m permiten limitar la velocidad de los vehículos ligeros a valores del orden de 35–40 km/h, considerados adecuados desde el punto de vista de la seguridad vial (Ministry of Transport, 2009).

- **Ancho de los carriles circulatorios**

La turbo rotonda dispone generalmente de dos carriles circulatorios con funciones diferenciadas:

Carril interior, destinado principalmente a movimientos de mayor recorrido, cuyo ancho debe permitir el paso del vehículo de diseño siguiendo trayectorias cerradas.

Carril exterior, destinado a movimientos de menor recorrido, con anchos ligeramente inferiores para reforzar el control de velocidad.

Los anchos de carril deben definirse de acuerdo con el radio interior adoptado y el vehículo de diseño considerado, verificándose posteriormente mediante análisis de barrido (Džambas et al., 2016).

- **Separador entre carriles**

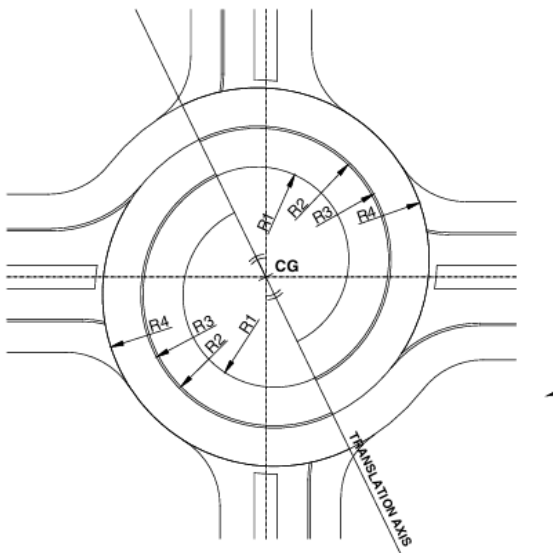
El separador entre carriles es un elemento esencial de la geometría de la turbo rotonda. Su función es impedir los cambios de carril dentro del anillo y reforzar la lectura geométrica de la intersección. Habitualmente se diseña como un separador elevado y montable, de anchura constante, que permite el paso ocasional de vehículos pesados sin comprometer la canalización de los vehículos ligeros (Porter et al., 2019).

- **Radios derivados del turbo bloque (R2, R3 y R4)**

A partir del radio interior R1 y de los anchos de carril y del separador, se definen los radios que delimitan los bordes de los carriles circulatorios. Estos radios permiten construir el denominado turbo bloque, que constituye la base geométrica del trazado en espiral como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Elementos de un turbo bloque



Nota. Tomado de Džambas et al. (2016a).

Las relaciones geométricas básicas pueden expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$R_2 = R_1 + w_i R_3 = R_2 + s R_4 = R_3 + w_e$$

donde:

- R_1 = radio interior del carril interior (m)
- w_i = ancho del carril interior (m)
- s = ancho del separador (m)
- w_e = ancho del carril exterior (m)

Para el diseño del turbo bloque se recomiendan ciertas dimensiones dependiendo del tamaño de la turbo rotonda, estas se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Dimensiones del turbo bloque dependiendo del tamaño de la turbo rotonda

Element	Turbo block template			
	Minimum	Regular	Medium	Large
R_1	10.45	12.00	14.95	19.95
R_2	15.85	17.15	20.00	24.90
R_3	16.15	17.45	20.30	25.20
R_4	21.20	22.45	25.25	29.95
L_1	5.75	5.30	5.15	5.15
L_2	5.05	5.00	4.95	4.25
Δv	5.75	5.30	5.15	5.15
Δu	5.05	5.00	4.95	4.25

Nota. Tomado de Džambas et al. (2016).

- Ejes de traslación y geometría en espiral

La característica espiral de la turbo rotonda se obtiene mediante el desplazamiento controlado de los centros de los arcos que definen los carriles circulatorios, conocidos como ejes de traslación. Estos desplazamientos permiten que cada carril conduzca progresivamente hacia una salida específica, sin necesidad de cambios de carril. Los valores de desplazamiento dependen del radio interior adoptado y se encuentran tabulados en los manuales holandeses (Fortuijn, 2009a).

- **Geometría de accesos y salidas**

Los accesos a la turbo rotonda deben diseñarse preferentemente de forma radial, con radios de entrada reducidos, con el fin de inducir una deflexión suficiente y limitar la velocidad de aproximación. Las salidas pueden presentar radios algo mayores, permitiendo una aceleración progresiva una vez completada la maniobra, siempre manteniendo coherencia con la geometría del anillo (Porter et al., 2019).

De acuerdo con las consideraciones anteriormente mencionadas, en la Tabla 6 se presentan valores geométricos típicos recomendados para el diseño de turbo rotondas.

Tabla 6

Dimensiones recomendadas para una turbo rotonda básica

Feature	Radius and Measurements (m)		
Inner radius	R1	12	15
Outer radius, inner lane	R2	17.15	20.00
Inner radius, outer lane	R3	17.45	20.30
Outer radius, outer lane	R4	22.45	25.20
Width start, inner lane		5.30	5.15
Width end, inner lane		5.00	4.90
Width, outer lane		5.00	4.90
Difference between lane width and width between lane marking			0.65
Width lane divider			0.30
Distance between center points for translation inner lane		5.35	5.15
Distance between center points for translation outer lane		5.05	4.95
Largest inscribed diameter		49.95	55.35
Smallest inscribed diameter		45.18	50.64
Entry radius and exit radius			10.00
Radius entering lane divider			12.00
Radius turning off lane divider			15.00
Width mountable central apron (for vehicles over 22 m)			5.00
Width mountable apron in armpit			1.50–3.00
Width mountable apron (for vehicles over 22 m)			5.00

Nota. Tomado de Fortuijn (2009a).

4.5. Señalización y canalización en turbo rotondas

Figura 5

Señalización en turbo rotondas



Nota. Tomado de Porter et al. (2019).

La señalización y la canalización constituyen elementos fundamentales para el correcto funcionamiento de las turbo rotondas, ya que complementan el diseño geométrico y permiten que los conductores comprendan y sigan adecuadamente las trayectorias previstas. A diferencia de las rotondas multicarril convencionales, en las que los conductores pueden modificar su carril dentro del anillo circulatorio, la turbo rotonda exige que la selección de la trayectoria se realice antes del ingreso a la intersección, lo que incrementa la importancia de una señalización clara, anticipada y coherente con la geometría (Porter et al., 2019).

Una geometría correctamente diseñada puede perder parte de sus beneficios si no se acompaña de un sistema adecuado de señalización horizontal y vertical. En este sentido, la señalización debe considerarse como un componente integral del diseño de la turbo rotonda y no como un elemento accesorio

4.5.1. Principios generales de señalización en turbo rotondas

La señalización en turbo rotondas se basa en los principios de claridad, coherencia y anticipación de la información. El objetivo principal es reducir la carga cognitiva del conductor y evitar maniobras tardías, especialmente cambios de carril de último momento.

Los manuales europeos y las guías de la FHWA coinciden en que la información sobre la asignación de carriles y los destinos permitidos debe proporcionarse progresivamente en los tramos de aproximación, reforzándose mediante señalización vertical y marcas viales coherentes entre sí (Porter et al., 2019).

Entre los principios fundamentales destacan:

- coherencia entre señalización vertical y horizontal,
- mensajes simples y fácilmente interpretables,
- repetición gradual de la información a medida que el conductor se aproxima a la intersección.

Zonas de entrecruzamiento

Las zonas de entrecruzamiento se definen como aquellos tramos de una intersección giratoria en los que los vehículos deben cruzar lateralmente la trayectoria de otros vehículos para alcanzar su salida deseada.

Uno de los principios fundamentales de la turbo rotonda es la eliminación de las zonas de entrecruzamiento, lograda mediante la combinación de geometría en espiral y separación física de carriles. A diferencia de las rotondas multicarril convencionales, la turbo rotonda no permite cambios de carril dentro del anillo circulatorio, lo que elimina los conflictos laterales asociados al entrecruzamiento (Porter et al., 2019).

Como consecuencia, los conflictos se reducen principalmente a conflictos convergentes, caracterizados por ángulos de impacto menores y una severidad reducida. Esta transformación de los patrones de conflicto explica en gran medida las mejoras en seguridad vial (Porter et al., 2019).

Implicaciones para la señalización horizontal y vertical

La eliminación de las zonas de entrecruzamiento mediante la geometría debe ser reforzada por la señalización. En las turbo rotondas, la señalización horizontal —especialmente las flechas direccionales, líneas de canalización y marcas de separación— desempeña un papel esencial para guiar al conductor hacia el carril correcto antes del ingreso.

De forma complementaria, la señalización vertical debe informar claramente los destinos accesibles desde cada carril, evitando mensajes ambiguos que puedan inducir errores de selección. La coherencia entre geometría y señalización es considerada un requisito indispensable para el correcto funcionamiento de las turbo rotondas y para la aceptación de este tipo de intersección por parte de los usuarios.

La señalización y la canalización en las turbo rotondas no solo complementan el diseño geométrico, sino que permiten materializar en la práctica la eliminación de las zonas de entrecruzamiento y los beneficios asociados en términos de seguridad vial. Una señalización adecuada garantiza que los conductores comprendan la lógica de funcionamiento de la intersección y sigan las trayectorias previstas, contribuyendo a una operación más segura y eficiente.

4.6. Seguridad vial en turbo rotondas

La seguridad vial constituye uno de los principales argumentos para la implementación de las turbo rotondas como alternativa a las rotondas multicarril convencionales. Diversos estudios han demostrado que este tipo de intersección presenta un desempeño superior en términos de reducción de accidentes, especialmente aquellos con lesiones, como resultado directo de su diseño geométrico

canalizado y de la eliminación de maniobras conflictivas dentro del anillo circulatorio (Porter et al., 2019).

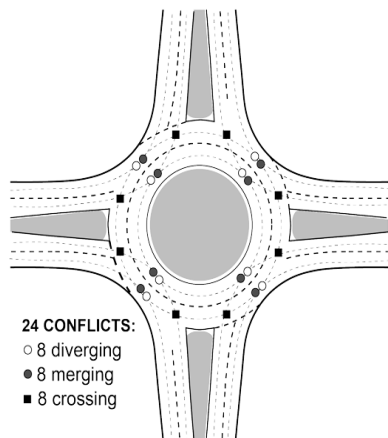
A diferencia de las rotondas multicarril convencionales, en las que la coexistencia de varios carriles sin separación física genera múltiples conflictos laterales, la turbo rotonda se concibe desde un enfoque de seguridad vial sostenible, priorizando trayectorias claras, velocidades moderadas y patrones de conflicto menos severos.

4.6.1. Puntos de conflicto

Los puntos de conflicto se definen como aquellos lugares de una intersección donde las trayectorias de dos o más vehículos se cruzan, se fusionan o se separan, generando la posibilidad de colisión. En el caso de las intersecciones giratorias, los conflictos pueden clasificarse generalmente en tres tipos: conflictos convergentes, divergentes y de entrecruzamiento (Fortuijn, 2009a).

En términos de seguridad vial, los conflictos de entrecruzamiento y los conflictos laterales presentan una mayor probabilidad de producir accidentes graves, debido a los mayores ángulos de impacto y a la complejidad de las maniobras requeridas como se muestra en la Figura 6 y Figura 7. Por esta razón, la reducción de este tipo de conflictos constituye un objetivo central en el diseño de intersecciones seguras (Tollazzi, 2015)

Las rotondas multicarril presentan un número elevado de puntos de conflicto, principalmente asociados a los cambios de carril dentro del anillo circulatorio. En una rotonda multicarril típica de cuatro accesos, pueden identificarse conflictos convergentes y divergentes en los accesos, así como numerosos conflictos de entrecruzamiento dentro del anillo, derivados de maniobras de selección de carril previas a la salida (Fortuijn, 2009a).

Figura 6*Puntos de conflicto en una rotonda convencional*

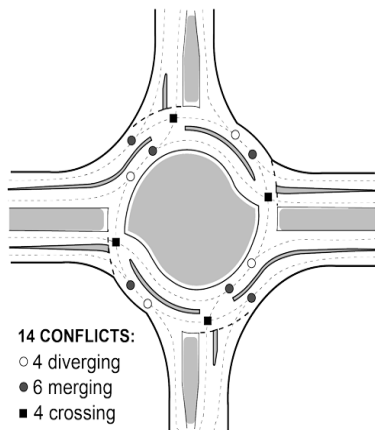
Nota. Tomado de Porter et al (2019).

Este patrón de conflictos incrementa la complejidad de la conducción y reduce la previsibilidad del comportamiento de los usuarios, lo que se traduce en una mayor frecuencia de accidentes, especialmente colisiones laterales y alcances. La literatura señala que estos conflictos son especialmente problemáticos bajo condiciones de tráfico elevado o cuando los conductores no están familiarizados con la intersección (Tollazzi, 2015).

Uno de los principales aportes de la turbo rotonda en materia de seguridad vial es la reducción significativa del número y del tipo de puntos de conflicto. Gracias a la canalización física de los carriles y a la geometría en espiral, la turbo rotonda elimina los conflictos de entrecruzamiento dentro del anillo circulatorio, permitiendo únicamente conflictos convergentes y divergentes claramente definidos (Porter et al., 2019).

Figura 7

Puntos de conflicto en una turbo rotonda



Nota. Tomado de Porter et al. (2019).

Estudios comparativos realizados en Europa indican que una turbo rotonda de cuatro accesos presenta aproximadamente la mitad de los puntos de conflicto de una rotonda multi carril convencional. Además, los conflictos restantes se caracterizan por ángulos de impacto menores, lo que reduce significativamente la severidad de los accidentes cuando estos ocurren (Fortuijn, 2009a).

4.6.2. Relación entre geometría, velocidad y severidad de los accidentes

La reducción de puntos de conflicto en las turbo rotondas se ve reforzada por el control de la velocidad de operación inducido por su geometría. La combinación de radios interiores reducidos, accesos radiales y trayectorias en espiral limita las velocidades típicas a valores del orden de 35–40 km/h, rango en el cual la probabilidad de lesiones graves disminuye de forma considerable (Fortuijn, 2009a).

La literatura destaca que no solo la cantidad de conflictos, sino también la velocidad y el ángulo de impacto, son factores determinantes en la severidad de los accidentes. En este sentido, la turbo

rotonda actúa simultáneamente sobre estos tres factores, lo que explica su buen desempeño en términos de seguridad vial (Porter et al., 2019).

La experiencia acumulada en los Países Bajos y en otros países europeos muestra reducciones sustanciales en la siniestralidad tras la conversión de rotondas multicarril convencionales en turbo rotondas. Fortuijn, 2009 reporta reducciones de hasta 70–80 % en accidentes con lesiones, así como una disminución significativa de accidentes graves.

De manera similar, estudios recientes en Estados Unidos, recopilados por la Federal Highway Administration, indican que las turbo rotondas presentan un desempeño de seguridad favorable, especialmente en contextos donde las rotondas multicarril convencionales mostraban altos índices de colisiones laterales (Porter et al., 2019).

En conjunto, la seguridad vial en las turbo rotondas se fundamenta en tres principios clave:

- reducción del número de puntos de conflicto,
- eliminación de conflictos de entrecruzamiento, y
- control efectivo de la velocidad de operación.

Estos principios, integrados en el diseño geométrico y reforzados mediante la señalización y la canalización, permiten que la turbo rotonda ofrezca niveles de seguridad superiores a los de las rotondas multicarril convencionales, constituyéndose como una solución eficaz para intersecciones con altos volúmenes de tránsito y exigencias elevadas de seguridad vial (Porter et al., 2019)

4.7. Microsimulación de tráfico

La microsimulación de tráfico es una técnica de modelación que representa de forma individualizada el comportamiento de cada vehículo dentro de una red vial. A diferencia de los modelos macroscópicos, que analizan el tráfico de manera agregada mediante variables promedio como flujo, velocidad y densidad, la microsimulación se basa en la interacción vehículo–vehículo y vehículo–

infraestructura, permitiendo reproducir fenómenos como cambios de carril, aceptación de brechas, formación de colas y variabilidad en los tiempos de viaje.

Diversos estudios internacionales y trabajos académicos han empleado la microsimulación para evaluar el desempeño de las turbo rotondas frente a intersecciones semaforizadas y rotondas convencionales de varios carriles. En particular, investigaciones desarrolladas en Europa y América han evidenciado que este tipo de intersección presenta mejoras en términos de seguridad y organización de flujos, siempre que su diseño y operación sean adecuados a la demanda existente.

4.7.1. Software Aimsun

Aimsun es un software especializado en modelación y simulación de tráfico que permite desarrollar análisis microscópicos, mesoscópicos y macroscópicos de redes viales. En el nivel microscópico, Aimsun modela el comportamiento individual de los vehículos a partir de algoritmos de seguimiento vehicular y aceptación de brechas, reproduciendo de manera detallada las interacciones que se producen en intersecciones complejas.

El software Aimsun cuenta con la capacidad para representar geometrías no convencionales, como las turbo rotondas, incorporando carriles segregados, separadores físicos y trayectorias en espiral, elementos característicos de este tipo de intersección. Esta capacidad resulta especialmente relevante para evaluar la correcta asignación de carriles y el cumplimiento de las trayectorias previstas en el diseño geométrico.

Además, permite la calibración y validación de los modelos a partir de datos de aforo, velocidades y tiempos de viaje, lo cual incrementa la confiabilidad de los resultados obtenidos. En estudios de intersecciones complejas, la calibración se considera una etapa clave del proceso de microsimulación, ya que garantiza que el modelo represente adecuadamente las condiciones locales de conducción y demanda vehicular.

5. Metodología

5.1. Zona de estudio

El área de estudio corresponde a la intersección denominada Redondel Tres Puentes, ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador; que por su configuración geométrica, el número de accesos y los volúmenes vehiculares registrados se presenta como una intersección crítica para la circulación vehicular en la ciudad. La intersección conecta seis vías urbanas principales: avenida Fray Vicente Solano, avenida primero de Mayo, avenida 24 de Mayo, avenida Don Bosco, Paseo Río Yanuncay y calle José Ortega y Gasset. Actualmente opera como una rotonda convencional multicarril.

A continuación, se presenta una imagen obtenida de Google Earth, donde se puede observar la distribución geométrica de la rotonda, destacando entre sus características que la rotonda actualmente abastece a 6 accesos.

Figura 8

Zona de estudio



Nota. Tomado de Google Earth.

5.2. Levantamiento de información

La información de tránsito se obtuvo mediante conteos vehiculares manuales realizados en días laborables durante mayo de 2024. El registro se efectuó en intervalos de 15 minutos, contabilizando los vehículos que ingresan a la intersección por cada aproximación y por movimiento. Se consideraron tres categorías vehiculares: vehículos livianos, buses y camiones.

A partir de los conteos realizados se identificó el periodo de mayor demanda vehicular mediante la suma de intervalos consecutivos de una hora. Dicho periodo se adoptó como escenario base de análisis para la evaluación operativa de la intersección.

5.2.1. Geometría actual

La geometría actual de la intersección se presenta como punto de partida para el análisis del sitio. Su descripción permite comprender la configuración existente y constituye la base para el planteamiento de la geometría de la turbo rotonda, considerando las condiciones reales y el espacio disponible.

Figura 9

Radio de la turbo rotonda y ancho de cada acceso



Nota. Elaboración propia.

5.2.2. Composición vehicular

Durante el conteo vehicular con intervalos de 15 minutos se registra un volumen total registrado de 18.183 vehículos mismos que se distribuyen de la siguiente manera en cada acceso.

Tabla 7

Distribución del tránsito por acceso

Acceso	Nombre del acceso	Volumen acumulado (veh)	Aporte (%)
Acceso A	Av. Fray Vicente Solano	6 205	34,1
Acceso B	Av. Primero de Mayo	1 948	10,7
Acceso C	Av. 24 de Mayo	1 916	10,5
Acceso D	Av. Don Bosco	2 211	12,2
Acceso E	Paseo Río Yanuncay	5 181	28,5
Acceso F	Calle José Ortega y Gasset	722	4,0
Total		18 183	100,0

Nota. Elaboración propia.

La composición vehicular identificada en el conteo vehicular se muestra en la Tabla 8:

Tabla 8

Composición vehicular del tránsito

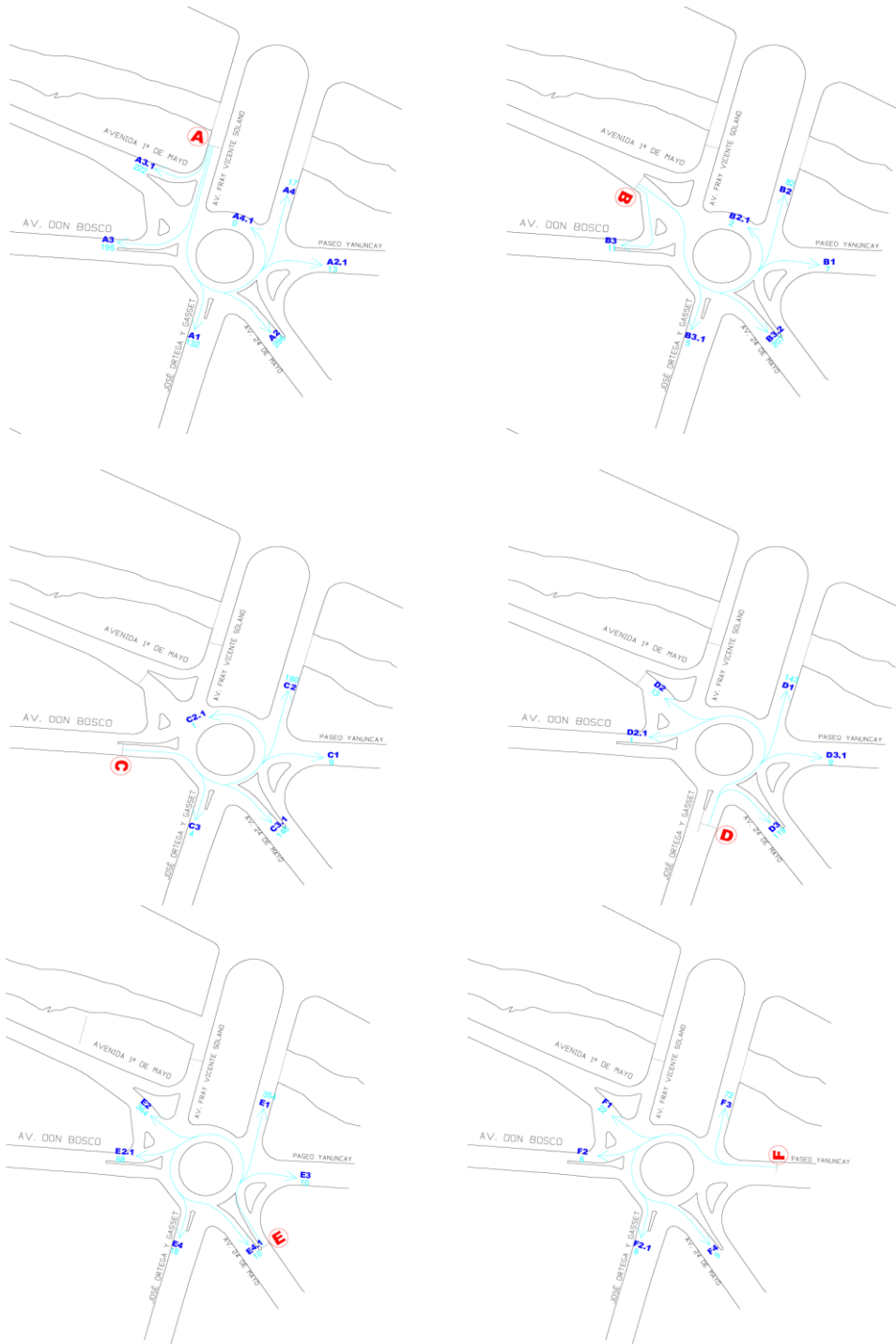
Tipo de vehículo	Volumen acumulado (veh)	Porcentaje (%)
Vehículos livianos	17 218	94,7
Buses	416	2,3
Camiones	549	3,0
Total	18 183	100,0

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con la información obtenida a partir de los conteos vehiculares se obtienen los siguientes datos de tráfico para cada acceso en la hora pico.

Figura 10

Movimientos y giros en cada acceso de la intersección de los Tres Puentes



Nota. Información obtenida de la Dirección de movilidad del cantón Cuenca, de acuerdo al conteo vehicular realizado en mayo de 2024.

5.3. Escenarios de análisis

En el presente trabajo se definen dos escenarios de análisis con el objetivo de evaluar el desempeño operativo y funcional de la intersección objeto de estudio. El escenario actual representa la geometría existente y las condiciones de operación vigentes, mientras que el escenario propuesto corresponde a una alternativa de mejora basada en la implementación de una turbo rotonda.

Ambos escenarios se analizan bajo dos horizontes temporales: una situación actual y un escenario futuro, este último definido a partir de una proyección del tráfico a 20 años. De esta manera, se evalúa el comportamiento de la intersección tanto en las condiciones presentes como frente a la demanda vehicular esperada a largo plazo. Para asegurar la comparabilidad de los resultados, en cada horizonte temporal ambos escenarios se modelan utilizando los mismos volúmenes vehiculares, composición del tránsito y supuestos operativos, de modo que las diferencias observadas en los indicadores analizados puedan analizarse para los mismos indicadores.

La caracterización de la demanda vehicular se realizó a partir de datos de conteo de tráfico correspondientes a la hora pico, los cuales incluyen volúmenes por acceso, sentido de circulación y tipo de vehículo. La composición del tránsito considera vehículos livianos, buses y vehículos pesados clasificados en diferentes categorías, lo que permite representar de manera adecuada las condiciones reales de operación de la intersección. Estos datos constituyen la base para la modelación tanto del escenario actual como del escenario propuesto en la situación presente, así como para la estimación de la demanda en el escenario futuro.

5.3.1. Escenario actual y futuro

El escenario actual representa la geometría existente y las condiciones de operación vigentes mientras que el escenario futuro se definió a partir de una proyección del tráfico a un horizonte de diseño de 20 años, correspondiente al año 2045. La proyección se realizó empleando un método

determinístico basado en la extrapolación de los volúmenes actuales mediante factores de crecimiento, manteniendo constante la composición vehicular y la distribución direccional del tránsito. A continuación, se muestra en la Tabla 9, el tráfico vehicular para el escenario actual(Anexo 3).

Tabla 9

Tráfico vehicular en el escenario actual (año 2025, hora pico)

Tipo de vehículo	Volumen (veh/h)
Livianos	2,763
Buses	116
Pesados (C2–C5)	213
Total	3,092

Nota. Elaboración propia.

La proyección de los volúmenes vehiculares para el escenario futuro se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$V_f = V_0 \cdot (1 + g)^n$$

donde:

- V_f = volumen vehicular proyectado en el año horizonte (veh/h),
- V_0 = volumen vehicular en el año base (veh/h),
- g = tasa anual de crecimiento del tráfico,
- n = número de años del horizonte de proyección.

Tabla 10

Tráfico vehicular en el escenario futuro (año 2035, hora pico; proyección a 10 años)

Tipo de vehículo	Volumen (veh/h)
Livianos	4,105
Buses	128
Pesados (C2–C5)	261
Total	4,494

Nota. Elaboración propia.

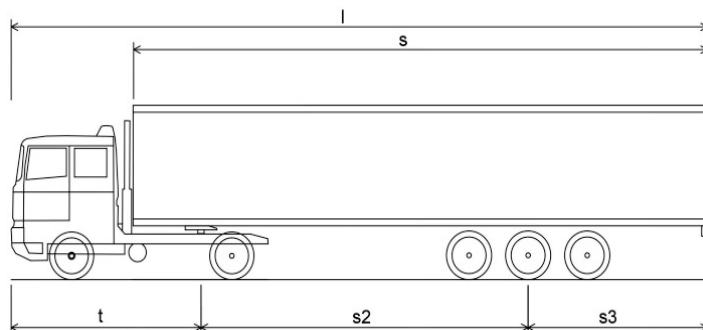
5.4. Parámetros geométricos del diseño propuesto

5.4.1. Vehículo de diseño

En Europa existen normativas de varios países con vehículos de diseño estandarizados (Países Bajos, Croacia, Alemania y Serbia) y no estandarizados (Eslovenia). Es importante tener en cuenta que el vehículo de diseño también se encuentra relacionado al tráfico de la zona de estudio, mientras que la turbo rotonda debe permitir al vehículo de diseño un paso sin interrupciones (Džambas et al., 2017a).

Figura 11

Vehículo de diseño



Nota. Tomado de Džambas et al. (2017a).

Los vehículos de diseños propuestos por las normativas europeas son camiones de dos ejes con un semirremolque de 3 ejes, para el estudio se considera la relación con la normativa ecuatoriana (MOP, 2003), por lo tanto, se toma como vehículo de diseño el establecido en la normativa holandesa de acuerdo a la Tabla 11 y la

Figura 11 .

Tabla 11

Dimensiones de elementos de acuerdo a vehículos de diseño estandarizados

Elemento:	Vehículo de Diseño			
	Países Bajos (CROW, 2008)	Croata (Autoridad Croata de Carreteras, 2014)	Alemana (FGSV, 2001)	Serbia (Autoridad Serbia de Carreteras, 2012)
Longitud total l [m]	16,5	16,5	16,53	15,4
Ancho total w [m]	2,55	2,5	2,5	2,5
Longitud de semitrailer s[m]	13,6	13,6	13,61	12,2
Distancia entre ejes s2 [m]	7,8	7,97	7,78	7,15
Voladizo trasero efectivo s3 [m]	4,2	4,03	4,25	3,75
Voladizo delantero t [m]	4,5	4,5	4,5	4,5

Nota. Adaptado de Džambas et al. (2017a).

En cuanto al vehículo de diseño, se adoptó el tipo 2S3 conforme a la normativa holandesa aplicada en el diseño de turbo rotondas, el cual resulta compatible con las condiciones geométricas propuestas y con la tipología vehicular observada en la zona, donde no se evidenció circulación frecuente de vehículos pesados mayores a dos ejes debido a su carácter urbano. Sin embargo, al contrastar con la Tabla de Pesos y Medidas vigente del MTOP, un vehículo tipo 3S3 requeriría mayores radios de giro que los contemplados en el diseño, lo que podría generar interferencias operativas. En consecuencia, se recomienda implementar señalización restrictiva en las aproximaciones a la intersección que limite el ingreso de vehículos de cinco o más ejes, garantizando así la seguridad y funcionalidad de la turbo rotonda.

5.4.2. Turbo bloque

La turbo rotonda se diseña a partir de un boceto auxiliar, donde se plantea un eje de traslación con un ángulo de inclinación respecto a la horizontal, la inclinación respecto a la horizontal que se recomienda es de 110 a 120 grados. Los centros de los arcos circulares se encuentran sobre el eje de traslación una distancia determinada del centro geométrico (Džambas et al., 2016).

Figura 12

Radios de los arcos circulares respecto al eje de traslación.

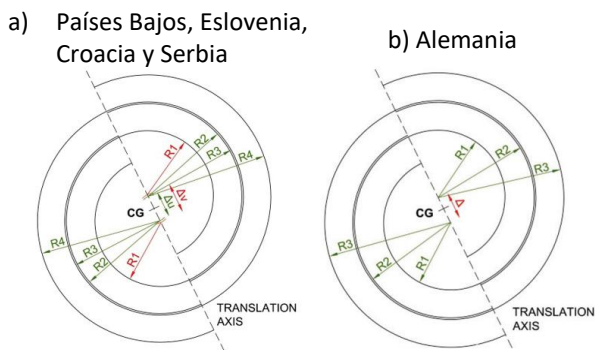


Nota. Tomado de Džambas et al. (2016).

Los turbo bloques en función de las normativas de sus respectivos países ha establecido ciertos parámetros de diseño. Dentro de estas consideraciones las normativas de Croacia, Serbia, Eslovenia y Países Bajos, consideran en su diseño 4 radios; en tanto que la normativa alemana únicamente considera 3 radios (Džambas et al., 2017a).

Figura 13

Elementos del turbo bloque



Nota. Tomado de *Džambas et al. (2017a)*.

Se puede observar en la Figura 13 que la diferencia de las gráficas se debe a la cantidad de radios, en el caso a), se considera un radio extra para la zona entre carriles continuos. Los centros de los arcos circulares para los radios son equidistantes del centro geométrico. En los países del caso b), han establecido ciertas plantillas de diseño en sus normativas, en tanto que Alemania no tiene plantillas de turbo bloques. Las plantillas de diseño varían principalmente del espacio disponible para su emplazamiento, se clasifican como mini, regular, mediana y grande (*Džambas et al., 2017a*).

Tabla 12

Dimensiones geométricas de las plantillas de Turbo Bloques

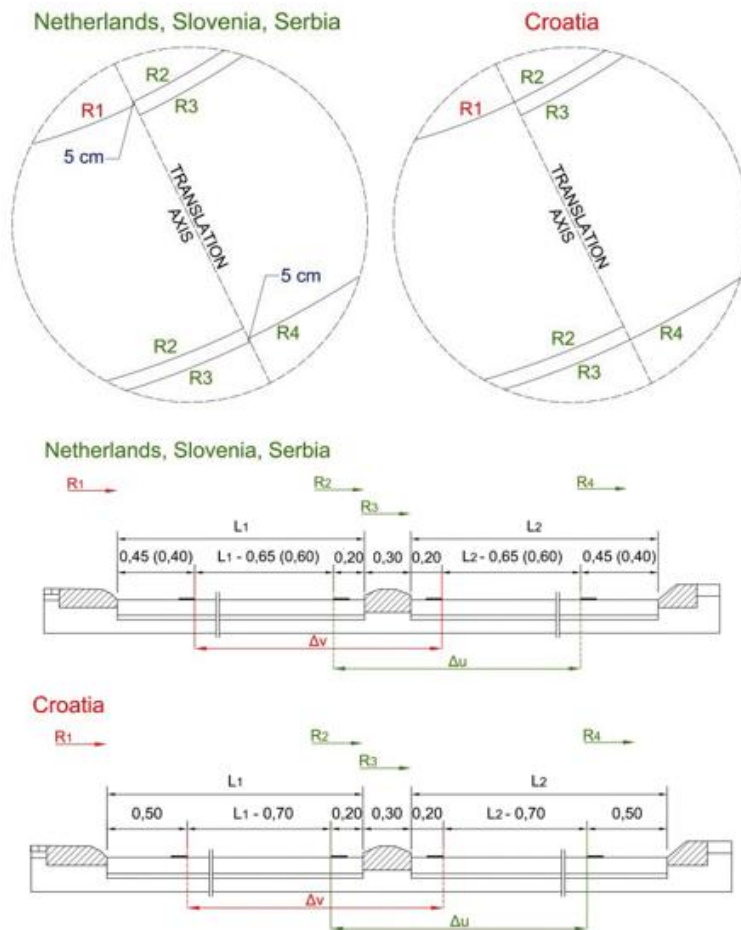
Elemento	Plantilla de Turbo Bloques							
	Mini		Regular		Mediana		Grande	
	Holandesa	Croata	Holandesa	Croata	Holandesa	Croata	Holandesa	Croata
	Eslovaca		Eslovaca		Eslovaca		Eslovaca	
	Serbia		Serbia		Serbia		Serbia	
R1 / m	10,50	10,45	12,00		15,00	14,95	20,00	19,95
R2 / m	15,85		17,15		20,00		24,90	
R3 / m	16,85		14,45		20,30		25,20	
R4 / m	21,15	21,20	22,45		25,20	25,25	29,90	29,95
L1 / m	5,35	5,40	5,15		5,00	5,05	4,90	4,95
L2 / m	5,00	5,05	5,00		4,90	4,95	4,70	4,75
Δv / m	5,75			5,35	5,30		5,15	
Δu / m	5,05			5,05	5,00		4,75	

Nota. Adaptado de *Džambas et al. (2017a)*.

En la Tabla 12 y Figura 14 se presentan los parámetros geométricos de las plantillas y su modelo gráfico, de donde se identifica que la plantilla de la normativa croata presenta una variación importante respecto a las otras 3 plantillas (Países Bajos, Eslovenia y Serbia) normas, esta diferencia es significativa ya que las medidas de la normativa croata permiten que exista una continuidad en el trazado de los arcos circulares, esta diferencia refleja una variación de 5cm en el radio 1 y radio 4 (Džambas et al., 2017b).

Figura 14

Geometría de plantillas normadas



Nota. Tomado de Džambas et al. (2017a).

Para la intersección de estudio ubicada en el sector de los 3 puentes, el modelo de turbo rotonda a emplear es el tipo rodilla (Knee) establecido en Fortuijn (2009). Salwan et al., 2021, durante su

investigación pudo generar una interpretación geométrica de este modelo, teniendo consideraciones como que el desplazamiento que se realiza en las turbo rotondas básicas, en este caso solo un centro de los arcos circulares se desplaza una distancia $Wc/2$ a lo largo del eje de traslación desde el centro geométrico, además, considera implementar de carriles de derivación. Dentro del estudio se conoce como Wc al ancho de carril y como m a la distancia entre el radio interior del primer carril de circulación y el radio interior que limita la zona transitable.

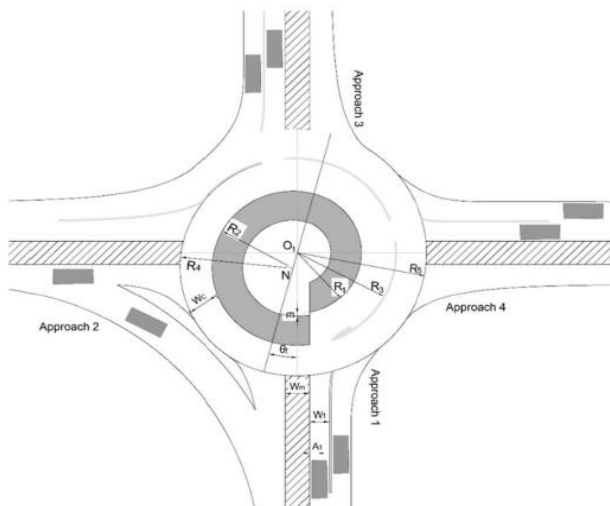
Los radios son definidos a partir de la siguiente ecuación:

$$R_i = \frac{Wc + m + 2 * R_{i-1}}{2}$$

Cuando el radio R_i es igual a R_1 , este radio se determina a partir de la Tabla 8, para nuestro caso se ha considerado a este valor en relación a la plantilla de un turbo bloque “mini”, por condiciones del espacio disponible siendo $R_1=10.50m$. En el Gráfico 14 y Gráfico 15 se observa el modelo de turbo rotonda tipo rodilla con las consideraciones del estudio realizado por (Salwan, 2019).

Figura 15

Modelo geométrico de la turbo rotonda aplicando el tipo rodilla para una turbo rotonda



Nota. Tomado de Salwan (2019).

Para la intersección de estudio, se ha definido los siguientes datos geométricos para modelo de la turbo rotonda.

Tabla 13

Datos geométricos de diseño

Wc	5.35 m
m	0.43 m
Xn	1.34 m
Yn	2.32 m
R2	13.39 m
R3	16.28 m
R4	19.17 m
R5	22.06 m

Nota. Elaboración propia.

5.4.3. Otros elementos de la Turbo Rotonda

Una vez establecido el turbo bloque se establece unos elementos como: isla central, divisores de carril, accesos y pasos laterales.

Isla Central

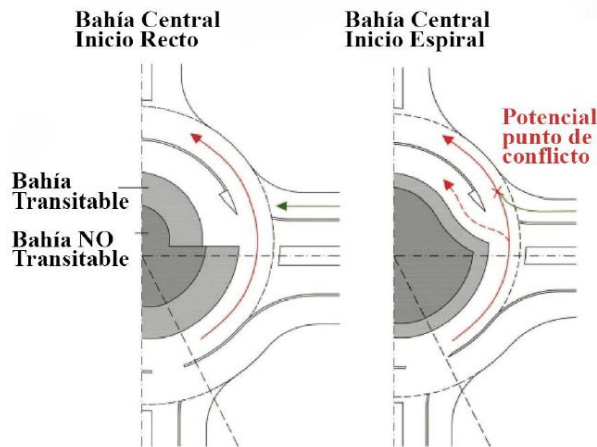
La isla central en relación con la estructura geométrica interna de la turbo rotonda define la zona transitable y los tipos de corte en el ingreso. La primera se define la zona transitable y la no transitable de la turbo rotonda, la bahía transitable permite que los vehículos utilicen esta zona en caso de emergencia, en tanto que, la zona no transitable es utilizada fundamentalmente para señalización, generando restricción en la visualización del horizonte mientras se encuentre en la turbo rotonda (CROW, 2008).

Para el caso de los cortes para ingreso al carril interior de la rotonda, se tiene dos casos, el primero un acceso recto, el cual conforme a la normativa holandesa evita confusión en los conductores

que ingresan a la turbo rotonda (Fortuijn, 2009b), y en el caso del ingreso curvo o espiral, permite un movimiento mucho más suave, pero evitando una disminución de velocidad (FHWA, 2020).

Figura 16

Bahías centrales y los tipos de accesos al carril interior



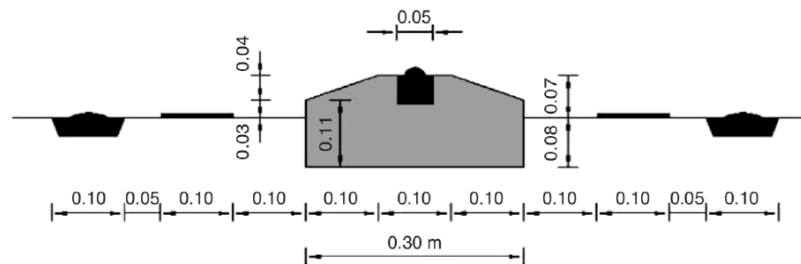
Nota. Tomado de Džambas et al. (2017a).

Divisores de carril

Los divisores de carril tienen entre sus objetivos evitar los cambios de carril, pero teniendo en consideración el paso del flujo vehicular pesado (FHWA, 2020). Con los separadores de carril se busca que no se ocasione daños a los vehículos, pero también que los conductores respeten el carril en el que se encuentran. Por lo tanto, se ha determinado que se definan a estos como elevados pero montables, a continuación, se presenta un gráfico de un separador de carril recomendado (Fortuijn, 2009b).

Figura 17

Separadores de carril montables y elevados

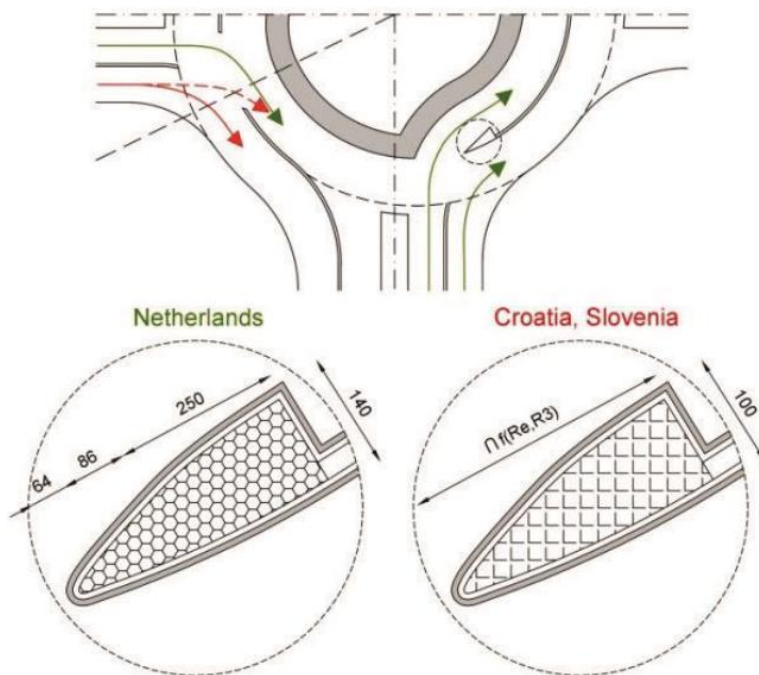


Nota. Tomado de Fortuijn (2009a).

Es importante tener en consideración el inicio de las zonas de separación de los carriles, ya que estos podrían permitir un cambio de carril de forma abrupta a los conductores en caso de que la geometría de separación del carril sea continua en esta zona, se recomienda un cambio de geometría teniendo una ampliación en el ingreso de tal manera que, evite el cambio abrupto de carril a los conductores que se encuentran dentro de la turbo rotonda, pero que permita el ingreso al carril interior a vehículos de gran longitud (Džambas et al., 2017b). La normativa holandesa propone que la longitud de este elemento sea de 4 metros (CROW, 2008).

Figura 18

Inicio de los separadores de carril



Nota. Tomado de Džambas et al. (2017a).

Es importante definir el ancho de separación entre la bahía transitable y el inicio de los separadores de carril, esto es necesario para el ingreso de los vehículos al carril interno de circulación de la turbo rotonda, para esto se tiene el criterio del recorrido del vehículo, en el caso de la normativa holandesa (CROW, 2008) se establece que se diseñe el recorrido en esta zona con un radio de 12m, en

tanto que otra normativa como la croata, indica que se debe realizar el recorrido con el vehículo de diseño (Džambas et al., 2017a).

Figura 19

Ancho del acceso al carril interior de circulación



Nota. Tomado de Džambas et al. (2017a).

Accesos de entrada

Para los accesos de entrada a la turbo rotonda, se debe tener en consideración la cantidad de carriles de ingreso o de salida de la turbo rotonda, las normativas existentes difieren, pero a continuación se presenta una tabla resumen que permiten que mayor flexibilidad al flujo vehicular (Džambas et al., 2017a).

Tabla 14

Parámetros recomendados para los carriles de acceso de entrada la turbo rotonda

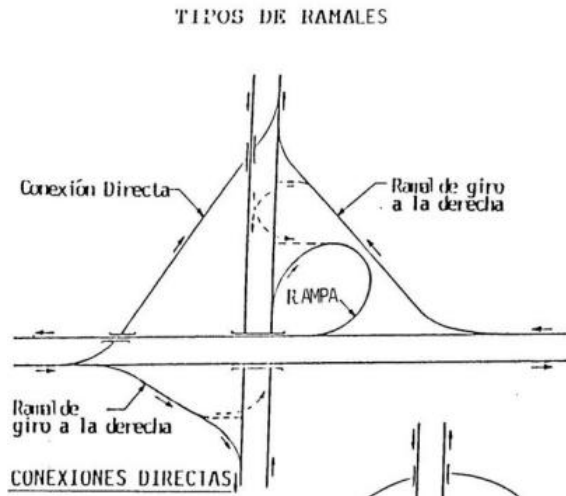
Parámetro	Valor recomendado		Normativa
Entrada y salida de un carril	Entrada: 4.00m	Salida: 4.50m	Alemania
Entrada y salida de dos carriles	Entrada: 3.50m	Salida: 4.00m	Alemania
Ancho mínimo isla divisoria	Países Bajos: 2.50m	Serbia: 2.00m	
Radios mínimos de las curvas de entrada y salida	Entrada: 12.00m	Salida: 15.00m	Eslovenia y Serbia

Nota. Adaptado de Džambas et al. (2017a).

Pasos laterales

Figura 20

Tipos de conexión de carriles mediante ramales y rampas



Nota. Tomado de Normas de diseño geométrico de carreteras (2003).

Para este caso de estudio se ha utilizado un paso lateral con giro a la derecha, pero para su aplicación geométrica se debe establecer ciertos parámetros de diseño. La velocidad de diseño de la vía principal permitirá determinar la velocidad de diseño en el ramal y el radio mínimo de curvatura para el mismo (NORMAS DE DISEÑO GEOMETRICO DE CARRETERAS, 2003). Además, en casos de que estos ramales tengan dos curvas continuas, se debe respetar las longitudes mínimas de los arcos circulares.

Tabla 15

Velocidad de diseño y radio mínimo en los pasos laterales

VELOCIDADES DE DISEÑO DE RAMALES EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DE LA AUTOPISTA								
Velocidad de diseño de la autopista, Km/h.	50	65	80	90	95	100	110	120
Velocidad de diseño del ramal, Km/h.								
DESEABLE	40	55	70	70	80	80	90	100
MINIMA	25	30	40	45	45	50	50	50
Radio Mínimo, (m).								
DESEABLE	42	100	160	160	210	210	275	350
MINIMO	20	25	42	56	56	75	75	75

Nota. Tomado de Normas de diseño geométrico de carreteras (2003).

Tabla 16

Longitud de arco requerido para pasos laterales con curvas compuestas

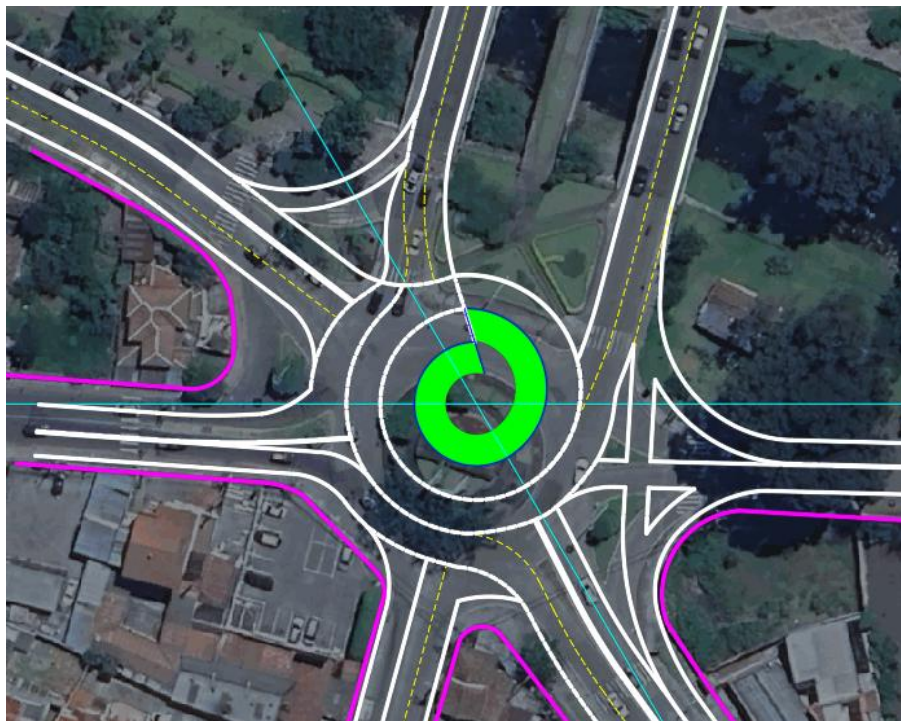
RADIO (m)	30	50	65	80	100	130	165 o más
Longitud del arco (m)							
MINIMA	13	15	20	25	35	40	45
DESEABLE	20	25	30	40	45	60	65

Nota. Tomado de Normas de diseño geométrico de carreteras (2003).

5.4.4. Verificación geométrica del modelo

Figura 21

Propuesta geométrica de la Turbo Rotonda



Nota. Elaboración propia.

El modelo geométrico propuesto para la intervención ha sido definido en función de los parámetros mencionados y se también se ha definido la cantidad de accesos y salidas.

La Av. Solano tiene 2 carriles de ingreso y dos de salida, además de un paso lateral hacia la Av. Don Bosco, con la particularidad de que accede al carril interior de la turbo rotonda; en el caso de la Av.

1ero de Mayo tiene un carril de ingreso y dos de salida, en el caso de la Av. Don Bosco tiene un ingreso y una salida de la turbo rotonda y un paso lateral que conecta a la Av. 24 de Mayo, el paso lateral sigue de forma paralela a la turbo rotonda debido al espacio disponible, en tanto que la Calle José Ortega y Gasset tiene una salida y 2 ingresos a la turbo rotonda. En el caso de la Av. 24 de Mayo tiene 2 salidas y un acceso a la turbo rotonda, con la incorporación del tráfico hacia la Av. 24 de Mayo desde la Calle Paseo Río Tarqui, además existe un paso lateral desde la Av. 24 de Mayo hacia la Av. Solano.

Figura 22

Verificación geométrica del modelo geométrico con el vehículo de diseño



Nota. Elaboración propia.

La verificación de todos los accesos se presenta en el Anexo 1, y fue realizado con el componente “Vehicle Tracking” del software “Civil 3D”.

6. Resultados y discusión

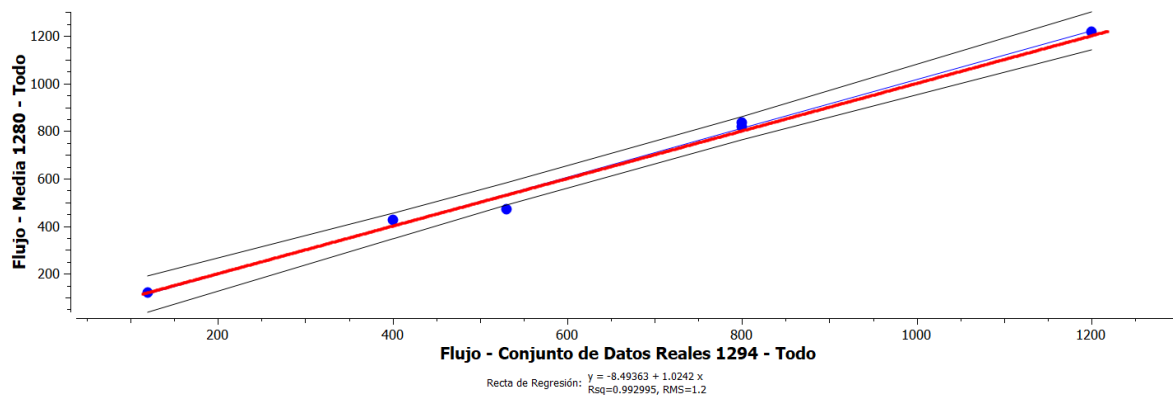
6.1. Validación del modelo de microsimulación

De forma preliminar a la generación de los modelos de microsimulación se debe generar una validación de la información a utilizar, para nuestro caso de estudio se ha verificado mediante 4 métodos:

- **Coefficiente de Determinación (R^2):** El coeficiente obtenido es de 0.993, lo cual implica que el modelo generado está directamente relacionado con el estado real de la intersección.
- **Pendiente (m):** Se tiene el valor de la pendiente $m=1.024$, lo cual indica que apenas se definió un 2.42% más del tráfico real.
- **Error cuadrático medio (RMS):** El resultado de $RMS=1.2$, indicando una baja dispersión de los datos respecto a la línea de tendencia.
-

Figura 23

Resultado gráfico de los parámetros estadísticos



Nota. Elaboración propia a partir del Software Aimsun.

- **Estadístico GEH:** Este parámetro estadístico es recomendado por la FHWA para la validación de volúmenes, los valores obtenidos para el parámetro estadístico son inferiores a 5,

estableciendo un excelente ajuste e indicando que el modelo ha sido calibrado de forma correcta.

Figura 24

Estadístico GEH de la intersección

Objeto	Flujo - Conjunto de Datos Reales 1294 - Todo	Flujo - Media 1280 - Todo	Diferencia Absoluta	Diferencia Relativa (%)	GEH
625: Acceso Paseo Río Yanuncay	120	121.1	1.1	0.916667	0.100186
584: Acceso José Ortega y Gasset	400	426.9	26.9	6.725	1.32294
580: Acceso Av. 24 de Mayo	800	817.5	17.5	2.1875	0.615362
1303: Acceso Solano a semáforo	1200	1216.3	16.3	1.35833	0.468951
1299: Acceso Av. Primero de Mayo	530	473.1	-56.9	-10.7358	2.54071
1298: Acceso Av. Solano	800	837.3	37.3	4.6625	1.30365
Media	641.667	648.7	7.03333	1.0961	1.05863

Nota. Elaboración propia a partir del Software Aimsun.







6.2. Diagnóstico operacional de la rotonda del estado actual

Es importante indicar que la modelación geométrica también analiza la intersección semaforizada de la Av. 27 de Febrero y la Av. Fray Vicente Solano, esto se debe a que la distancia entre ambas intersecciones es corta y tiene influencia directa en la rotonda.

La clasificación de los niveles de servicio se lo representa respecto a la siguiente gráfica.

Figura 25

Representación gráfica de los niveles de servicio

	0.00 - 10.00	LOS "A"
	10.00 - 15.00	LOS "B"
	15.00 - 25.00	LOS "C"
	25.00 - 35.00	LOS "D"
	35.00 - 50.00	LOS "E"
	50.00 - inf	LOS "F"

Nota. Elaboración propia a partir del Software Aimsun.

Los resultados de la modelación para el estado actual nos indican que la rotonda tiene una demora promedio de 73 segundos, lo cual corresponde a un nivel de servicio "F".

Tabla 17

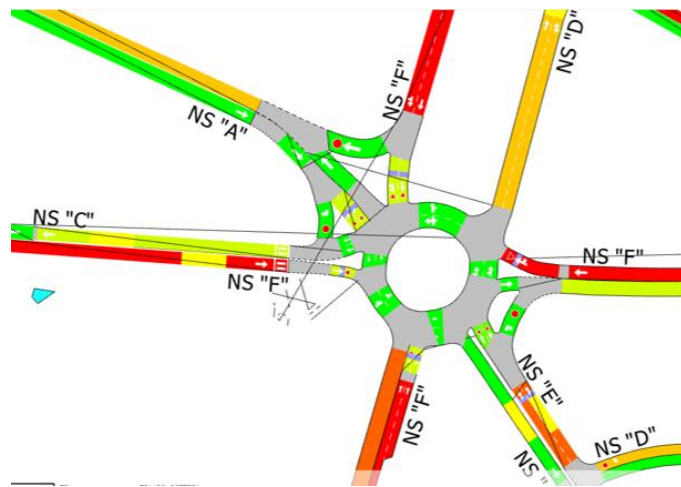
Tiempos de demora en la rotonda. Estado actual

ACCESO	TIEMPO DE DEMORA (seg)
Av. Fray Vicente Solano	75
Av. Primero de Mayo	21
Av. Don Bosco	16
Calle Jose Ortega y Gasset	58
Av. 24 de Mayo	47
Calle Paseo Yanuncay	111

Nota. Elaboración propia.

Figura 26

Niveles de servicio en la rotonda. Estado actual



Nota. Elaboración propia a partir del Software Aimsun.

En tanto que, en la intersección semaforizada la demora promedio es de 143 segundos, que también clasifica como nivel de servicio "F".

Tabla 18

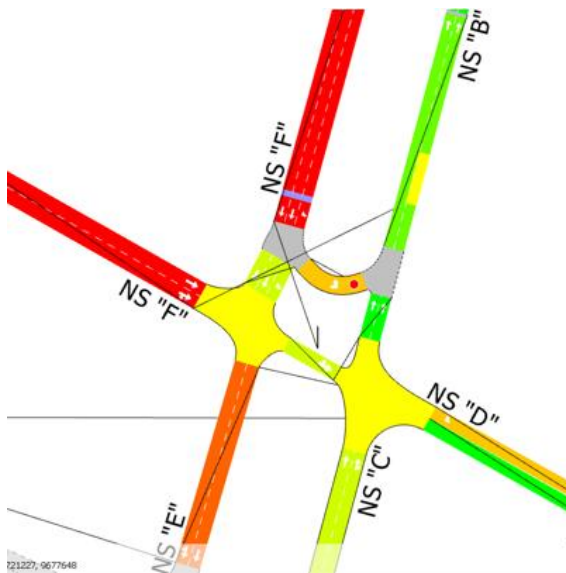
Tiempos de demora en la intersección semaforizada. Estado actual

ACCESO	TIEMPO DE DEMORA (seg)
Av. Fray Vicente Solano (N-S)	199
Av. 27 de Febrero (Sentido O-E)	87
Av. 27 de Febrero (Sentido E-O)	54
Av. Fray Vicente Solano (S-N)	35

Nota. Elaboración propia.

Figura 27

Niveles de servicio en la intersección semaforizada – estado actual



Nota. Elaboración propia a partir del Software Aimsun.

6.3. Evaluación del modelo propuesto con turbo rotonda para el tráfico actual

La implementación de la turbo rotonda en lugar de la rotonda existente, genera una mejora significativa en el desempeño de la misma, disminuye los tiempos de demora de 73 a 34 segundos, esta reducción es aproximadamente del 53%, implicando una mejora del nivel de servicio de "F" a "D".

Tabla 19

Tiempos de demora en la turbo rotonda. Propuesta geométrica turbo rotonda

ACCESO	TIEMPO DE DEMORA (seg)
Av. Fray Vicente Solano	93
Av. Primero de Mayo	39
Av. Don Bosco	10
Calle Jose Ortega y Gasset	5
Av. 24 de Mayo	21
Calle Paseo Yanuncay	2

Nota. Elaboración propia.

Figura 28

Niveles de servicio en la turbo rotonda. Propuesta geométrica turbo rotonda



Nota. Elaboración propia a partir del Software Aimsun.

La variación en los tiempos de demora y niveles de servicio, se da como consecuencia la modificación de los flujos vehiculares, eliminación de entrecruzamientos y asignación anticipada de las trayectorias.

Pese a esto al analizar de manera continua la zona de estudio, la intersección semaforizada mantiene un nivel de servicio "F", con una demora promedio de 166 segundos.

Tabla 20

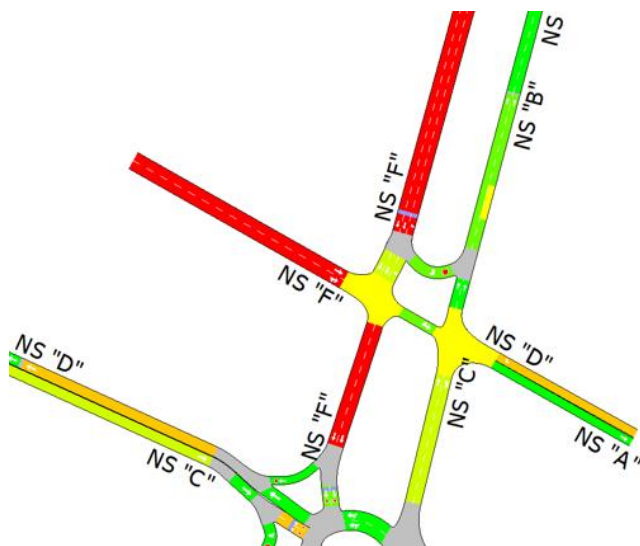
Tiempos de demora en la intersección semaforizada. Propuesta geométrica turbo rotonda

ACCESO	TIEMPO DE DEMORA (seg)
Av. Fray Vicente Solano (N-S)	248
Av. 27 de Febrero (Sentido O-E)	85
Av. 27 de Febrero (Sentido E-O)	28
Av. Fray Vicente Solano (S-N)	51

Nota. Elaboración propia.

Figura 29

Niveles de servicio en la intersección semaforizada. Propuesta geométrica turbo rotonda



Nota. Elaboración propia a partir del Software Aimsun.

Con los resultados del análisis complementario se establece que pese a que la aplicación de la turbo rotonda mejora de forma importante la operación dentro de su nodo, se requiere realizar ajustes para la zona semaforizada para que su efecto tenga mayor efectividad.

6.4. Evaluación del modelo propuesto con turbo rotonda para el tráfico proyectado

El periodo de diseño que se proyecta es de 10 años, a partir de ese periodo de tiempo se analiza y se obtiene que la demora aumenta a 66 segundos, ubicándose nuevamente la intersección en un nivel de servicio "F", pese a esto se debe tener en cuenta que el desempeño en función del volumen es considerablemente superior. En virtud del análisis de la propuesta geométrica, también se han realizado modificaciones geométricas que se puedan efectuar en el tiempo, para que durante el periodo de diseño sea útil la propuesta implementada.

Tabla 21

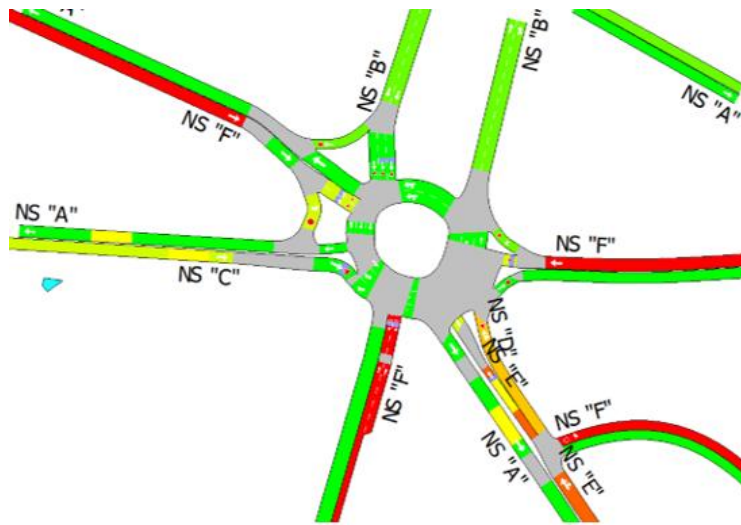
Tiempos de demora en la turbo rotonda a los 10 años

ACCESO	TIEMPO DE DEMORA (seg)
Av. Fray Vicente Solano	11
Av. Primero de Mayo	88
Av. Don Bosco	28
Calle Jose Ortega y Gasset	113
Av. 24 de Mayo	45
Calle Paseo Yanuncay	107

Nota. Elaboración propia.

Figura 30

Niveles de servicio en la turbo rotonda a los 10 años



Nota. Elaboración propia a partir del Software Aimsun.

Por su parte la intersección semaforizada tiene un promedio de demora de 100 segundos, pese a esto se debe tener en cuenta que se han realizado modificaciones geométricas en la turbo rotonda (carril de acceso desde la Av. Fray Vicente Solano) que afecta directamente a la intersección semaforizada, permitiendo realizar cambios en el ciclo semafórico.

Tabla 22

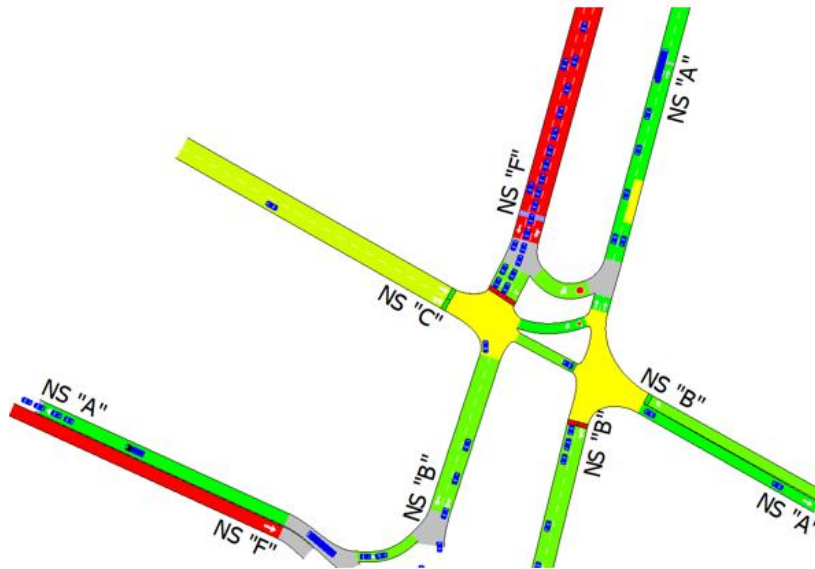
Tiempos de demora en la intersección semaforizada a los 10 años

ACCESO	TIEMPO DE DEMORA (seg)
Av. Fray Vicente Solano (N-S)	175
Av. 27 de Febrero (Sentido O-E)	24
Av. 27 de Febrero (Sentido E-O)	12
Av. Fray Vicente Solano (S-N)	17

Nota. Elaboración propia.

Figura 31

Niveles de servicio en la intersección semaforizada a los 10 años



Nota. Elaboración propia a partir del Software Aimsun.

6.5. Análisis comparativo integral de los escenarios

Los resultados indican variación en los niveles de servicio, analizando la implementación directa de la propuesta de intervención (Nivel de servicio "D"), como después del periodo propuesto de diseño de 10 años, el nivel de servicio al intervenir la intersección con una turbo rotonda disminuye sus demoras de forma considerable, pese a que a futuro la intersección debe implicar ciertas reformas geométricas para evitar problemas de congestionamiento el nivel de servicio nuevamente vuelve a ser "F" pero esta vez con condiciones de tráfico mucho más exigentes, lo que implica eficiencia del diseño propuesto.

También es importante considerar que el análisis para esta zona de estudio, no se debe desarrollar de forma aislada el nodo de la intersección que actualmente esta con la rotonda, debido a que también se debe realizar el análisis de la intersección semaforizada vecina, por su proximidad a la

rotonda, lo cual implica que se debe realizar ciertos ajustes también la intersección semaforizada para que la propuesta en el nodo de estudio tenga mayor efectividad.

Los resultados obtenidos a través de la microsimulación, indican que la implementación de la turbo rotonda es una solución técnicamente viable para mitigar problemas de congestión y mejorar la operación del tránsito, esto debido a que se observó las mejoras en relación al nivel de servicio y su capacidad en relación al crecimiento vehicular en un periodo de diseño de 10 años. Por lo tanto, la turbo rotonda debe ser considerada con el eje principal de una gestión vial respecto al flujo vehicular más amplia, la cual implica ajustes semafóricos.

7. Conclusiones

Los principios de diseño considerados en la propuesta de diseño se fundamentaron en metodologías europeas, pero teniendo en consideración su aplicación dentro de la ciudad de Cuenca. Además, las turbo rotondas son una solución técnicamente consolidada para intersecciones con alta demanda vehicular, las cuales combinan mejoras de capacidad con la seguridad vial.

En cuanto al vehículo de diseño, se adoptó el tipo 2S3 conforme a la normativa holandesa para turbo rotondas, al ser coherente con la geometría propuesta y con el tránsito predominante en el sector, de carácter urbano y sin presencia habitual de vehículos pesados de más de dos ejes; no obstante, considerando un escenario crítico de acuerdo a la Tabla de Pesos y Medidas del MOP, un vehículo tipo 3S3 demandaría radios de giro mayores a los previstos, pudiendo generar interferencias operativas, por lo que se recomienda establecer señalización restrictiva en los accesos que limite el ingreso de vehículos de cinco o más ejes, a fin de asegurar la adecuada operación y seguridad de la intersección.

El modelo de microsimulación desarrollado por el software Aimsun presenta una alta confiabilidad técnica, esta validación se realizó mediante diferentes métodos, entre los cuales está el estadístico GEH que sus resultados son menores a 5 en cuanto a la variabilidad de los datos, cumpliendo con los criterios de la FHWA.

Al analizar el estado actual de la rotonda, se estableció que su nivel de servicio es F con una demora promedio de 73s, al realizar una microsimulación considerando la intersección semaforizada se obtuvo para esta un nivel de servicio F con una demora promedio de 143s, afirmando que la intersección de estudio presenta una congestión elevada en la hora de máxima demanda vehicular.

La implementación de la turbo rotonda en condiciones de tráfico actuales, mejor el desempeño de forma significativa disminuye el promedio de demoras en la intersección de 73s a 34s, con un nivel de servicio D, además implica que la longitud de colas sea menor y el flujo vehicular sea más estable.

Los resultados de la evaluación realizada a la intersección con la turbo rotonda, establecen que existe una mayor eficiencia de los flujos vehiculares, siendo una solución eficiente en relación al desempeño operacional de la intersección. Pese a esto se identificó que en la intersección semaforizada el nivel de servicio se mantiene en F, implicando que la solución debe ser integral entre la turbo rotonda y la intersección semaforizada, para aumentar la efectividad y su solución sea integral.

El análisis para el escenario futuro proyecta el tráfico a los 10 años, determina que el nivel de servicio es nuevamente “F”, pero con la particularidad de que el volumen ha aumentado de forma significativa, estableciendo que la solución implementada permitirá que las condiciones operativas se encuentren controladas durante el período de diseño. Además, se ha realizado gestión semafórica en la intersección respectiva lo que ha permitido que la solución sea viable en el periodo de diseño.

Desde el punto de vista de seguridad vial la propuesta geométrica planteada reduce de forma significativa los conflictos vehiculares y realiza un control de velocidad debido a su geometría, aumentando de forma sustancial la seguridad.

La implementación de la turbo rotonda en el sector de los Tres Puentes es una solución viable y efectiva, pero debe ser una solución integral con la intersección semaforizada de la Av. Solano y Av. 27 de Febrero para que el proyecto aumente su efectividad, siendo de esta manera una solución que permitirá mitigar la congestión y mejorar la funcionalidad en la intersección, tanto en condiciones actuales como futuras.

En la turbo rotonda propuesta, los seis accesos incorporarán pasos peatonales y ciclistas ubicados fuera del anillo circulatorio y posteriores a las islas separadoras, de modo que el cruce se realice en dos fases claramente definidas. Las islas canalizadoras permiten que el peatón o ciclista

complete cada etapa del cruce de manera independiente, reduciendo la longitud efectiva de exposición al tráfico y asegurando la interacción con un solo flujo vehicular por vez, lo que mejora la visibilidad y la comprensión del punto de conflicto.

En coherencia con las recomendaciones técnicas de diseño, la intersección contará con señalización vertical preventiva de cruce peatonal y ciclista en cada aproximación, marcas horizontales tipo cebrá de alta visibilidad, líneas de detención adelantadas respecto al cruce y delineación clara de carriles mediante canalización física y demarcación espiral propia de la configuración turbo. Dada la naturaleza del diseño, con trayectorias fijas y velocidades de operación estables en el rango de 35–40 km/h, estas medidas complementan el control geométrico de velocidad y refuerzan la legibilidad de la intersección, garantizando una integración segura y ordenada de peatones y ciclistas en los seis accesos.

Finalmente, la propuesta desarrolla puede servir como referencia para otras intersecciones críticas dentro de la ciudad de Cuenca, pero es importante que esta información sea complementada con gestión semafórica.

Referencias

Corriere, F. & Guerrieri, M. (2012). Performance Analysis of Basic Turbo-Roundabouts in Urban Context. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 622–632.

<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.912>

CROW. (2008). *Turborotondes (Turbo Roundabouts)* (Publication No. 257).

Džambas, T., Ahac, S. & Dragčević, V. (2016). Design of turbo roundabouts based on the rules of vehicle movement geometry. *Journal of Transportation Engineering*, 142(7).

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000850](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000850)

Džambas, T., Ahac, S. & Dragčević, V. (2017a). Geometrijsko oblikovanje turbokružnih raskrižja.

Tehnicki Vjesnik, 24(1), 309–318. <https://doi.org/10.17559/TV-20151012162141>

Džambas, T., Ahac, S. & Dragčević, V. (2017b). Geometrijsko oblikovanje turbokružnih raskrižja.

Tehnicki Vjesnik, 24(1), 309–318. <https://doi.org/10.17559/TV-20151012162141>

FHWA. (2020). Turbo Roundabouts. <http://safety.fhwa.dot.gov>

Fortuijn, L. G. H. (2009a). Turbo roundabouts. *Transportation Research Record*, 2096, 16–24.

<https://doi.org/10.3141/2096-03>

Fortuijn, L. G. H. (2009b). Turbo roundabouts - Design Principles and Safety Performance.

Transportation Research Record, 2096, 16–24. <https://doi.org/10.3141/2096-03>

Francisco, J., Serrano, M., Belén, M., Brito, Z., Marcelo, J. & Ordoñez, A. (2023). Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil Cuenca-Ecuador.

<https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Gallelli, V., Perri, G. & Vaiana, R. (2021). Operational and safety management at intersections: Can the turbo-roundabout be an effective alternative to conventional solutions? *Sustainability*

(Switzerland), 13(9). <https://doi.org/10.3390/su13095103>

- Mauro, R., Cattani, M. & Guerrieri, M. (2015). Evaluation of the safety performance of turbo roundabouts by means of a potential accident rate model. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10(1), 28–38. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.04>
- NORMAS DE DISEÑO GEOMETRICO DE CARRETERAS, (2003).
- Ministry of Transport, P. W. and W. Management. (2009). Roundabouts – Application and design: A practical manual.
- Porter, Gooch, Peach, Chestnutt, Moore, Broeren & Tigelaar. (2019). Advancing Turbo Roundabouts in the United States: Synthesis Report FHWA Safety Program. <http://safety.fhwa.dot.gov>
- Quito Informa. (2019, 29. March). Primer turboredondel en Ecuador será una realidad. <https://www.quitoinforma.gob.ec/2019/03/29/1er-turboredondel-en-ecuador-sera-una-realidad/>
- Salwan, A. (2019). DESIGN GUIDELINES FOR TURBO ROUNDABOUT BASED ON INTERSECTION SIGHT DISTANCE TO CIRCULATING CONFLICTING VEHICLE.
- Salwan, A., Easa, S. M., Raju, N. & Arkatkar, S. (2021). Intersection Sight Distance Characteristics of Turbo Roundabouts. <https://doi.org/10.3390/designs>
- SWOV. (2022). Roundabouts and other intersections.
- Tollazzi, T. (2015). Alternative types of roundabouts: An informational guide. <http://www.springer.com/series/11059>
- Transportation Research Board. (2000). Highway capacity manual. Transportation Research Board, National Research Council.

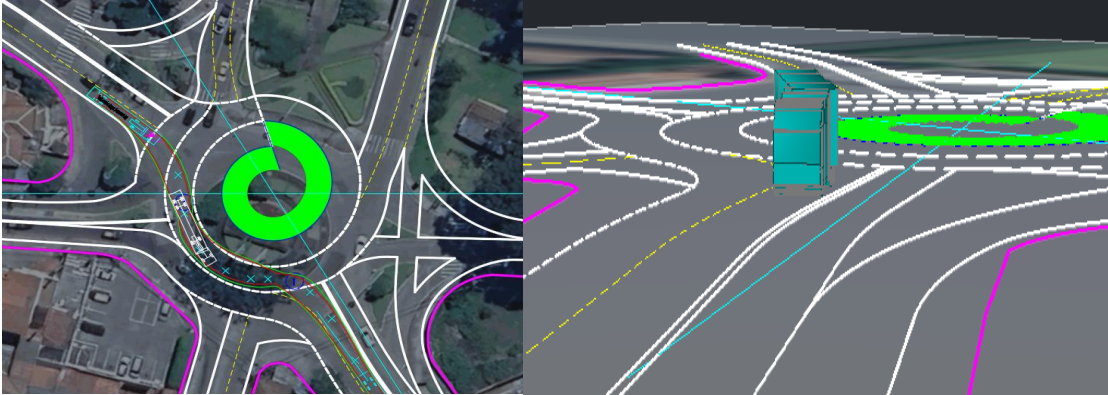
ANEXO 1. VERIFICACIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO

- Acceso de la Av. Solano

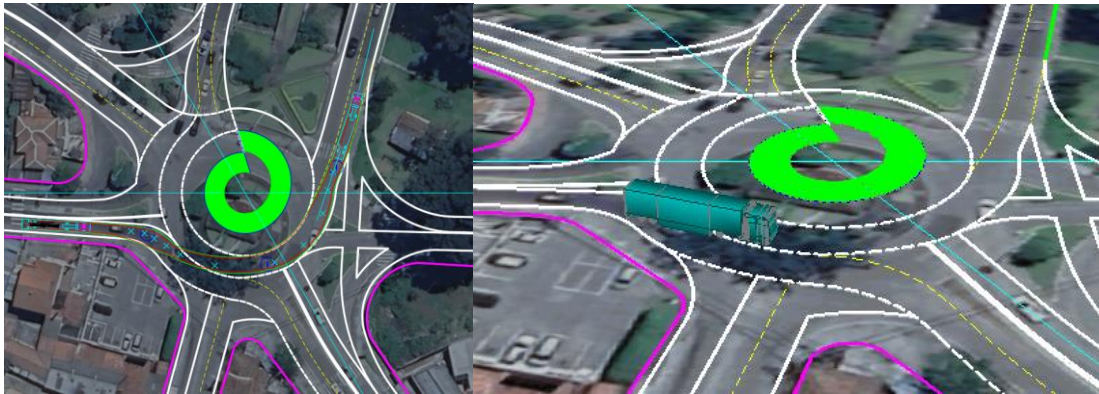


- Acceso de la Av. 1era de Mayo



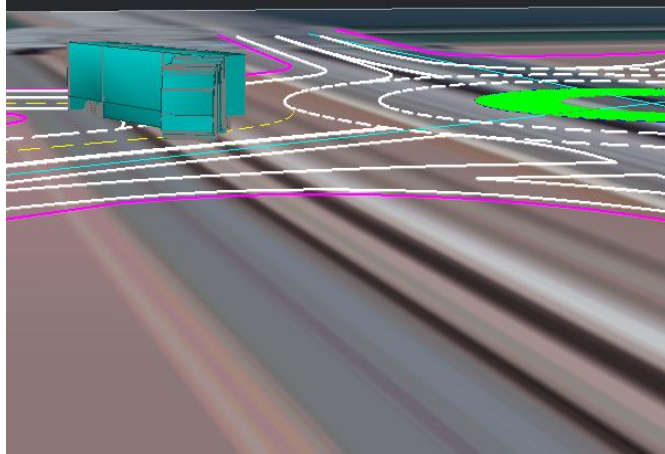


- Acceso de la Av. Don Bosco



- Calle José Ortega y Gasset hacia Av. 1ero de Mayo

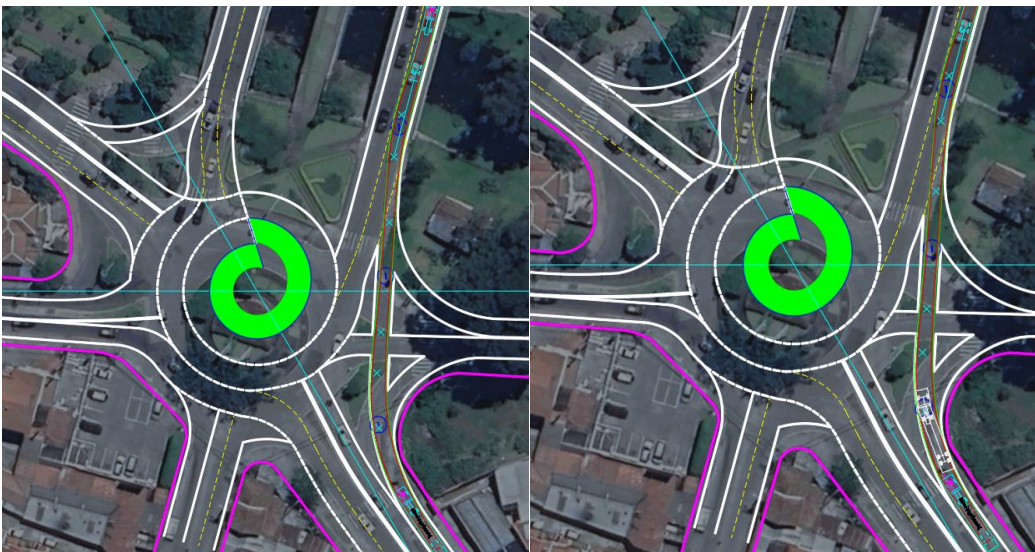


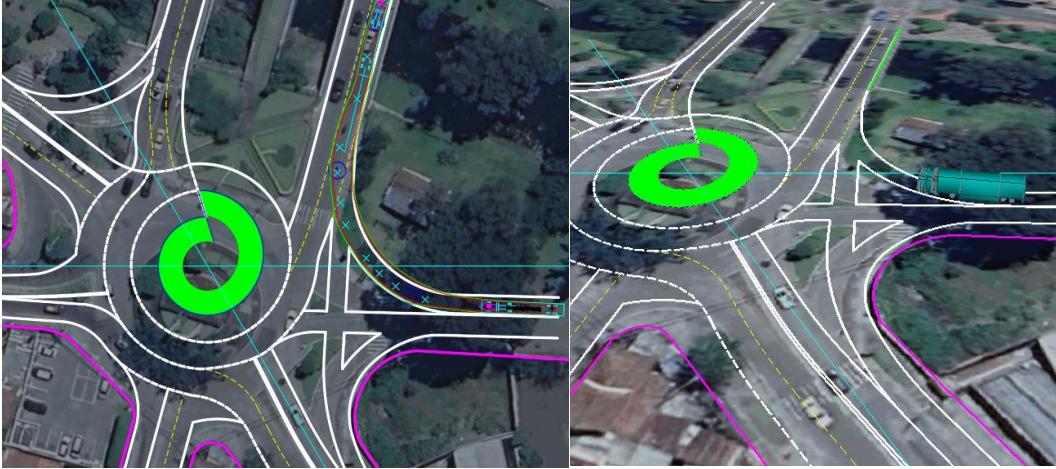


- Acceso desde la Av. 24 de Mayo



- Paso Lateral





ANEXO 2. ESTUDIO DE TRÁFICO

- OBJETIVOS

El objetivo del estudio de tráfico es realizar una investigación de campo para obtener información a fin de establecer la demanda actual y futura de tráfico, la misma que servirá para el dimensionamiento de la estructura del pavimento. El estudio desarrolla los siguientes aspectos:

- Conteo volumétrico manual clasificado de tráfico para la hora pico.
- Determinación del factor de hora pico.
- Tráfico actual
- Tráfico futuro.

- TRABAJOS DE CAMPO

Los trabajos de campo estuvieron dirigidos a estimar la demanda de viajes y sus características fundamentales, dentro de las que se incluye el tipo de vehículo, número de ejes de camiones, etc., estos trabajos fueron los siguientes:

- En primer lugar, se efectuaron conteos manuales clasificados por tipo de vehículos, los cuales se realizaron en un periodo de 12 horas, durante siete días.
- En segundo lugar, se analizó los resultados de la hora pico.

- LEVANTAMIENTO MANUAL DE TRÁFICO

El diseño o rectificación de una carretera o de un tramo de la misma debe basarse entre otras informaciones en los datos sobre tráfico, con el objetivo de compararlo con la capacidad, es decir con el volumen máximo de vehículos que una carretera puede absorber. El tráfico en consecuencia afecta directamente a las características del diseño geométrico y al diseño de la estructura de pavimento.

La información sobre tráfico debe comprender la determinación del tráfico actual (volúmenes y tipos de vehículos), para luego establecer los estudios de tráfico futuro utilizando pronósticos.

Los datos del conteo manual fueron tomados en las dos direcciones, cortando en forma estratégica en sub-períodos de 15 minutos. Las fichas para la captura de datos no solamente constan de columnas para identificar la clase de vehículo, sino también una gráfica del vehículo representativo de esa clase, cuya descripción es:

- Liviano.- Todo vehículo con dos ejes y el eje posterior de llanta simple.
- Buses.- Todo vehículo destinado al transporte de pasajeros y pueden ser de:
- 2 ejes con eje posterior de llanta doble.
 - 3 ejes con ejes posteriores de llanta doble.
- Camiones.- Todo vehículo destinado al transporte de carga y pueden ser de:
- 2 ejes y el eje posterior de llanta doble.
 - 3 ejes (mulas).
 - Tráiler de 4, 5 y 6 ejes.

- TRABAJOS DE OFICINA

Una vez recopilada toda la información se procedió a la codificación y digitalización de ésta, a la vez que se realizó un análisis de consistencia de la información levantada con el fin de desechar aquella información incompleta o considerada como no válida.

RESULTADOS DEL CONTEO VOLUMÉTRICO

VOLUMEN DE TRÁFICO

El procesamiento de datos consistió en el análisis detallado de la hora pico en el redondel de los 3 puentes que es de 14:15 a 15:15. Los resultados para cada acceso a la rotonda de los 3 puentes son los siguientes:

Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
1	Av. Solano	A4	Av. Solano	17	0	0	0	0	0
		A2.1	Paseo Yanuncay	11	2	0	0	0	0
		A2	Av. 24 de Mayo	256	12	28	0	0	0
		A1	Jose ortega y Gasset	130	0	2	0	0	0
		A3	Av. Don Bosco	155	32	8	0	0	0
		A3.1	Av. 1ero de Mayo	210	0	12	0	0	0

Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
2	Av. 1ero de Mayo	B2.1	1ero. de Mayo	2	0	0	0	0	0
		B2	Av. Solano	76	2	4	0	0	0
		B1	Paseo Yanuncay	5	2	0	0	0	0
		B3	Av. Don Bosco	11	0	0	0	0	0
		B3.1	Jose Ortega y Gasset	5	0	0	0	0	0
		B3.2	Av. 24 de Mayo	191	2	14	0	0	0

Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
3	Av. Don Bosco	C2.1	Av. Don Bosco	1	0	0	0	0	0
		C2	Av. Solano	142	30	8	0	0	0
		C1	Paseo Yanuncay	7	0	2	0	0	0
		C3	Jose ortega y Gasset	4	0	0	0	0	0
		C3.1	Av. 24 de Mayo	132	4	12	0	0	0

Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
4	Jose Ortega y Gasset	D2.1	Av. Don Bosco	1	0	0	0	0	0
		D2	Av. Primero de Mayo	11	2	0	0	0	0
		D1	Av. Solano	139	4	0	0	0	0
		D3	Av. 24 de Mayo	115	0	4	0	0	0
		D3.1	Paseo Yanuncay	7	0	2	0	0	0

Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
5	Av. 24 de Mayo	E4.1	Av. 24 de Mayo	8	0	2	0	0	0
		E4	Jose Ortega y Gasset	16	0	2	0	0	0
		E2.1	Av. Don Bosco	58	8	2	0	0	0
		E2	Av. 1ero de Mayo	318	4	42	0	0	0
		E1	Av. Solano	312	0	42	0	0	0
		E3	Paseo Yanuncay	8	2	0	0	0	0

Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
6	Paseo Yanuncay	F4	Av. 24 de Mayo	9	0	0	0	0	0
		F2.1	Jose Ortega y Gasset	6	0	2	0	0	0
		F2	Av. Don Bosco	2	0	4	0	0	0
		F1	Av. 1ero de Mayo	18	0	4	0	0	0
		F3	Av. Solano	68	2	2	0	0	0

- **FACTOR HORA PICO PHF**

Se utiliza el factor de hora pico para determinar el tráfico para diseño en relación a la hora pico, teniendo en consideración los volúmenes de vehículos cada 15 minutos dentro de la hora pico, el factor de hora pico se determina de la siguiente manera:

$$PHF = \frac{\sum \text{Vehiculos durante la hora pico}}{4 * \text{Máximo volumen durante 15 minutos de la hora pico}}$$

Los resultados obtenidos de factor de hora pico para cada acceso son los siguientes:

Acceso	Calle	PHF
1	Av. Solano	0.845
2	Av. 1ero de Mayo	0.902
3	Av. Don Bosco	0.961
4	Jose Ortega y Gasset	0.828
5	Av. 24 de Mayo	0.945
6	Paseo Yanuncay	0.713

Los resultados de tráfico obtenidos para el análisis del estado actual es el siguiente:

Proyección con el factor de hora pico									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
1	Av. Solano	A4	Av. Solano	20	0	0	0	0	0
		A2.1	Paseo Yanuncay	13	2	0	0	0	0
		A2	Av. 24 de Mayo	303	14	33	0	0	0
		A1	Jose ortega y Gasset	153	0	2	0	0	0
		A3	Av. Don Bosco	183	37	9	0	0	0
		A3.1	Av. 1ero de Mayo	248	0	14	0	0	0

Proyección con el factor de hora pico									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
2	Av. 1ero de Mayo	B2.1	1ero. de Mayo	2	0	0	0	0	0
		B2	Av. Solano	84	2	4	0	0	0
		B1	Paseo Yanuncay	5	2	0	0	0	0
		B3	Av. Don Bosco	12	0	0	0	0	0
		B3.1	Jose Ortega y Gasset	5	0	0	0	0	0
		B3.2	Av. 24 de Mayo	211	2	15	0	0	0

Proyección con el factor de hora pico									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
3	Av. Don Bosco	C2.1	Av. Don Bosco	1	0	0	0	0	0
		C2	Av. Solano	147	31	8	0	0	0
		C1	Paseo Yanuncay	7	0	2	0	0	0
		C3	Jose ortega y Gasset	4	0	0	0	0	0
		C3.1	Av. 24 de Mayo	137	4	12	0	0	0

Proyección con el factor de hora pico									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
4	Jose Ortega y Gasset	D2.1	Av. Don Bosco	1	0	0	0	0	0
		D2	Av. Primero de Mayo	13	2	0	0	0	0
		D1	Av. Solano	167	4	0	0	0	0
		D3	Av. 24 de Mayo	138	0	4	0	0	0
		D3.1	Paseo Yanuncay	8	0	2	0	0	0

Proyección con el factor de hora pico									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
5	Av. 24 de Mayo	E4.1	Av. 24 de Mayo	8	0	2	0	0	0
		E4	Jose Ortega y Gasset	16	0	2	0	0	0
		E2.1	Av. Don Bosco	61	8	2	0	0	0
		E2	Av. 1ero de Mayo	336	4	44	0	0	0
		E1	Av. Solano	330	0	44	0	0	0
		E3	Paseo Yanuncay	8	2	0	0	0	0

Proyección con el factor de hora pico									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
6	Paseo Yanuncay	F4	Av. 24 de Mayo	12	0	0	0	0	0
		F2.1	Jose Ortega y Gasset	8	0	2	0	0	0
		F2	Av. Don Bosco	2	0	5	0	0	0
		F1	Av. 1ero de Mayo	25	0	5	0	0	0
		F3	Av. Solano	95	2	2	0	0	0

- PROYECCIONES DEL TRÁFICO PROMEDIO DIARIO ANUAL – TPDA (PROYECCIONES DE DISEÑO)

Las proyecciones del tráfico se refieren a llevar el TPDA asignado para el año 2025 al final del período de construcción y luego cada cinco años durante un periodo de 20 años, en este caso para el diseño se tomará como periodo de diseño 10 años.

Las proyecciones de tránsito servirán especialmente para:

- Dimensionar las características geométricas de la vía y de la capa de rodadura.
- Cuantificar los beneficios por efecto de ahorro en los costos de operación de los vehículos y tiempo de viaje (Factibilidad Económica).

En la tabla se presenta las tasas de crecimiento por cada tipo de vehículo las cuales son utilizadas por la coordinación de Factibilidad del MTOP para la provincia del Azuay.

TASAS DE CRECIMIENTO PROYECTO MTOP			
PERIODO	LIVIANOS	BUSES	CAMIONES
2020-2025	5.04%	1.97%	3.19%
2025-2030	4.41%	1.77%	2.88%
2030-2035	3.88%	1.61%	2.61%
2035-2040	3.49%	1.50%	2.42%
2040-2045	3.24%	1.43%	2.29%

Para la proyección se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_f = V_0 \cdot (1 + g)^n$$

donde:

- V_f = volumen vehicular proyectado en el año horizonte (veh/h),
- V_0 = volumen vehicular en el año base (veh/h),
- g = tasa anual de crecimiento del tráfico,
- n = número de años del horizonte de proyección.

Con estas tasas se proyecta el tráfico 2025 para un periodo de 10 años.

Proyección a 10 años (Año 2035)									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
1	Av. Solano	A4	Av. Solano	29	0	0	0	0	0
		A2.1	Paseo Yanuncay	19	2	0	0	0	0
		A2	Av. 24 de Mayo	453	16	43	0	0	0
		A1	Jose ortega y Gasset	228	0	2	0	0	0
		A3	Av. Don Bosco	274	43	11	0	0	0
		A3.1	Av. 1ero de Mayo	371	0	18	0	0	0

Proyección a 10 años (Año 2035)									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
2	Av. 1ero de Mayo	B2.1	1ero. de Mayo	2	0	0	0	0	0
		B2	Av. Solano	125	2	4	0	0	0
		B1	Paseo Yanuncay	7	2	0	0	0	0
		B3	Av. Don Bosco	16	0	0	0	0	0
		B3.1	Jose Ortega y Gasset	7	0	0	0	0	0
		B3.2	Av. 24 de Mayo	315	2	19	0	0	0

Proyección a 10 años (Año 2035)									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
3	Av. Don Bosco	C2.1	Av. Solano	1	0	0	0	0	0
		C2	Paseo Yanuncay	220	35	10	0	0	0
		C1	Av. 24 de Mayo	9	0	2	0	0	0
		C3	Jose ortega y Gasset	4	0	0	0	0	0
		C3.1	Av. 24 de Mayo	204	4	14	0	0	0

Proyección a 10 años (Año 2035)									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
4	Jose Ortega y Gasset	D2.1	Av. Don Bosco	1	0	0	0	0	0
		D2	Av. Primero de Mayo	19	2	0	0	0	0
		D1	Av. Solano	250	4	0	0	0	0
		D3	Av. 24 de Mayo	206	0	4	0	0	0
		D3.1	Paseo Yanuncay	10	0	2	0	0	0

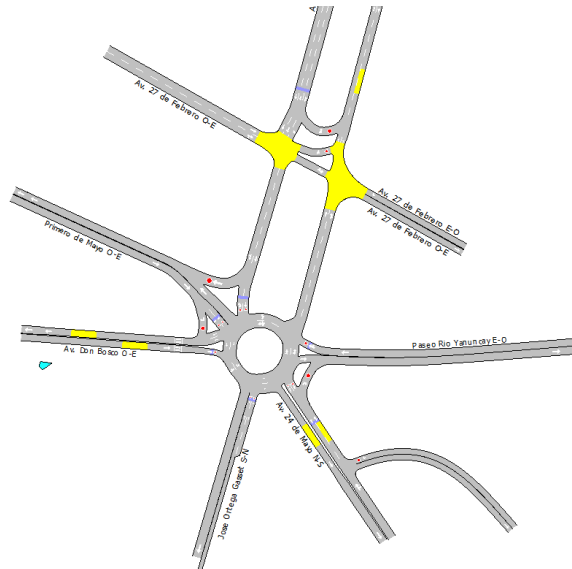
Proyección a 10 años (Año 2035)									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
5	Av. 24 de Mayo	E4.1	Av. 24 de Mayo	10	0	2	0	0	0
		E4	Jose Ortega y Gasset	22	0	2	0	0	0
		E2.1	Av. Don Bosco	90	8	2	0	0	0
		E2	Av. 1ero de Mayo	503	4	56	0	0	0
		E1	Av. Solano	494	0	56	0	0	0
		E3	Paseo Yanuncay	10	2	0	0	0	0

Proyección a 10 años (Año 2035)									
Nro. Acceso	Calle	Sentido	Calle	Livianos	Bus	C2	C3	C4	C5
6	Paseo Yanuncay	F4	Av. 24 de Mayo	16	0	0	0	0	0
		F2.1	Jose Ortega y Gasset	10	0	2	0	0	0
		F2	Av. Don Bosco	2	0	5	0	0	0
		F1	Av. 1ero de Mayo	37	0	5	0	0	0
		F3	Av. Solano	141	2	2	0	0	0

ANEXO 3. Memoria Técnica: Microsimulación de Tráfico y Evaluación de Propuesta Geométrica en Rotonda Tres Puentes – Cuenca, Ecuador.

1. Introducción y Alcance

- **Objetivo:** Evaluar la operación del tráfico actual y verificar la viabilidad técnica de la reforma geométrica propuesta.
- **Área de Estudio:** Polígono entre la “Virgen de Bronce” y los accesos a los “Tres puentes”.

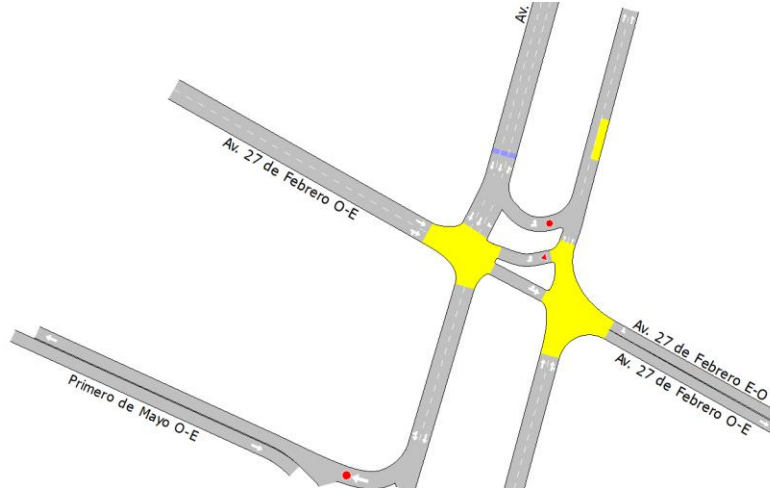


- **Herramienta:** Aimsun 8.1.

2. Datos de Entrada:

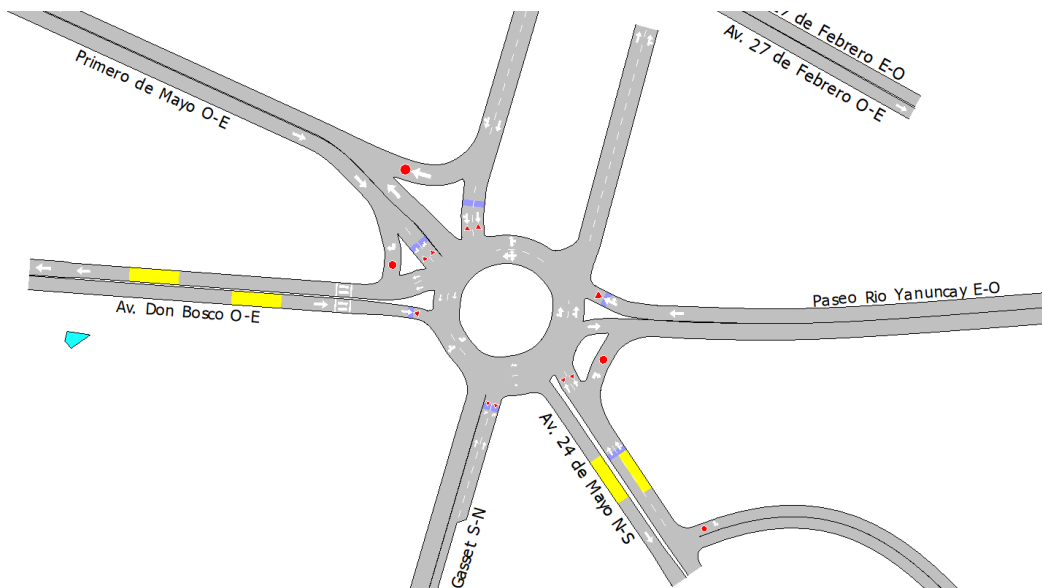
2.1 Geometría y Red vial existente:

- **Av. Fray Vicente Solano y Av. 27 de Febrero (accesos a intersección semaforizada):**
 - ❖ **Av. Fray Vicente Solano N-S:** 3 carriles de 3m.
 - ❖ **Av. Fray Vicente Solano S-N:** 2 carriles de 3m.
 - ❖ **Av. 27 de Febrero O-E:** 2 carriles de 4m.
 - ❖ **Av. 27 de Febrero E-O:** 1 carriles de 3.75m.



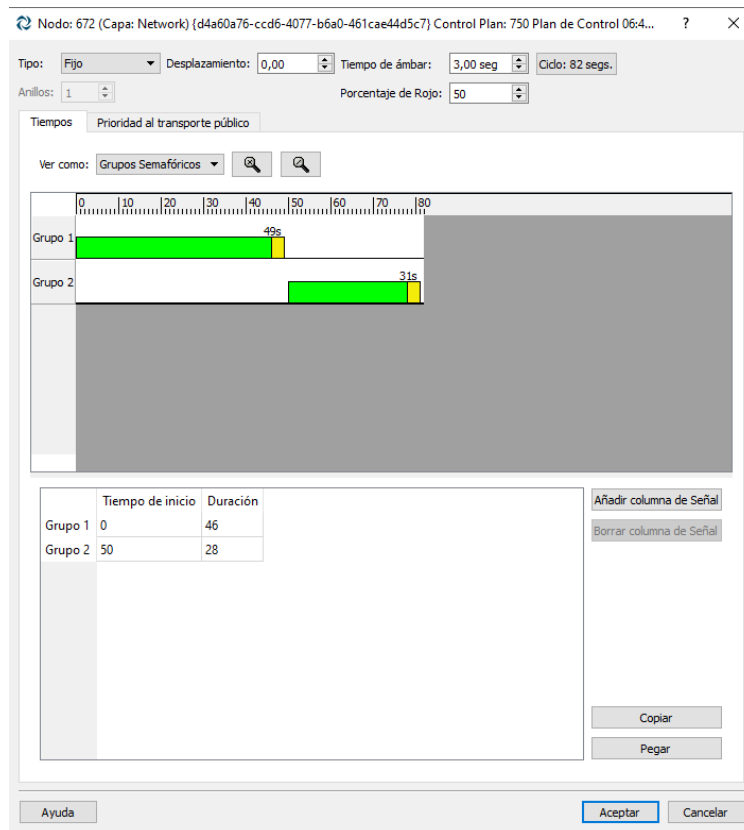
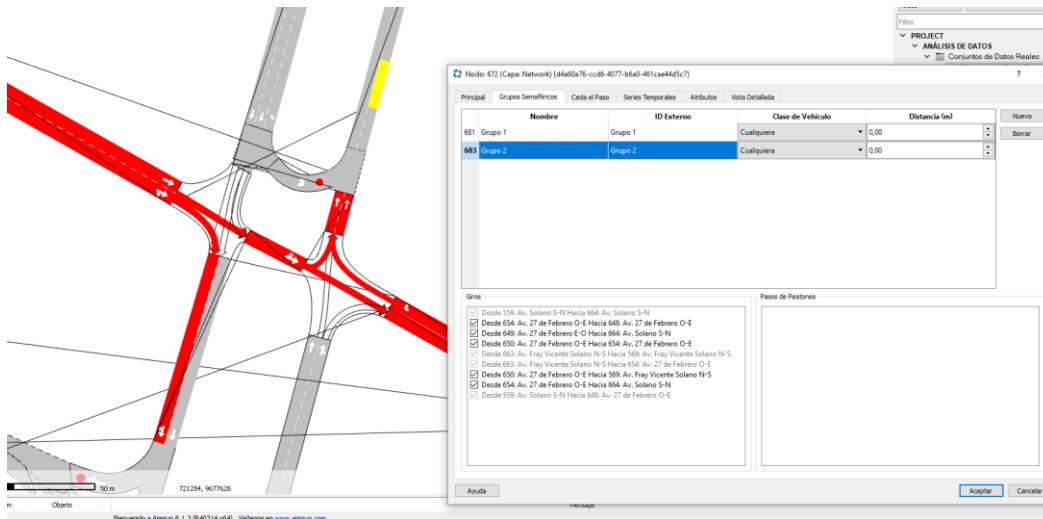
- **Tres puentes (accesos a Rotonda):**

- ❖ **Av. Fray Vicente Solano N-S:** 2 carriles de 3,50m.
- ❖ **Av. Primero de Mayo O-E:** 2 carriles de 3m en acceso a Rotonda.
- ❖ **Av. Don Bosco O-E:** 1 carril de 3.50m
- ❖ **José Ortega y Gasset:** 2 carriles de 3m.
- ❖ **Av. 24 de Mayo S-N:** 2 carriles de 3m.
- ❖ **Paseo Río Yanuncay:** 1 carril de 5m.



2.2 Configuración semafórica existente:

- Regulador Av. Fray Vicente Solano y Av. 27 de Febrero:

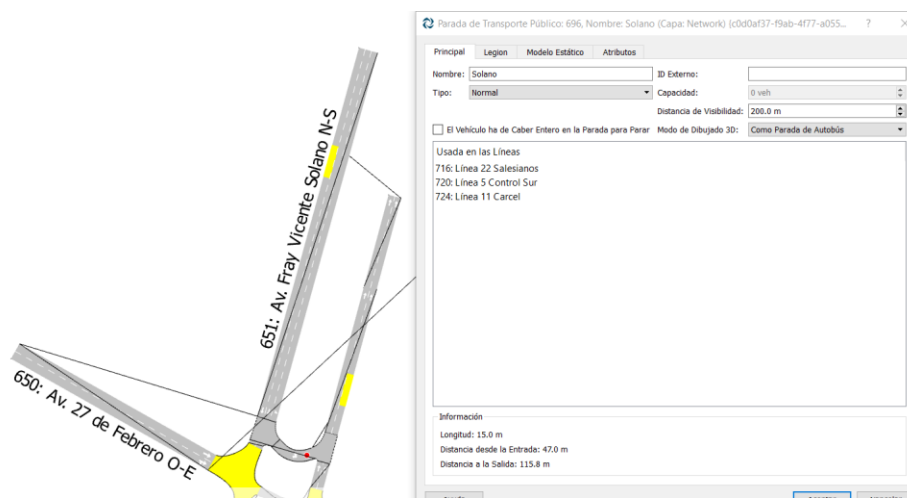


2.3 Demanda de tráfico:

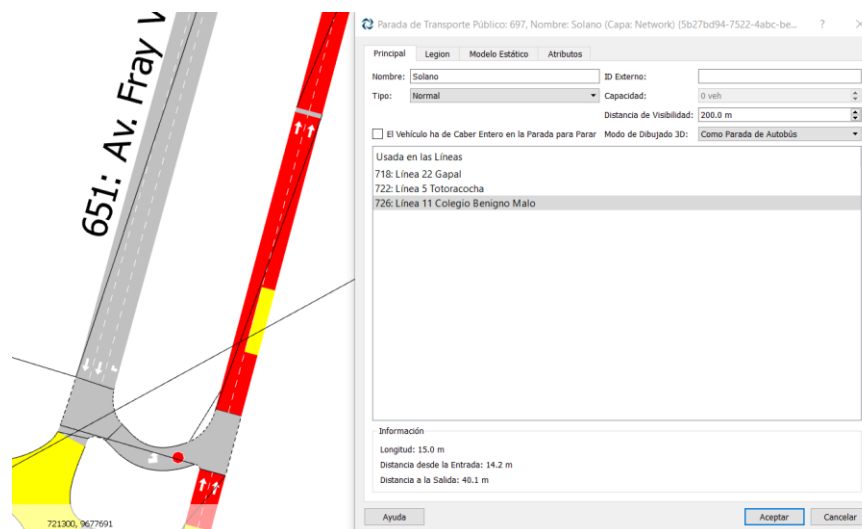
2.3.1 Estaciones de transporte público:

Se han creado las estaciones de transporte público que se encuentran dentro de la red vial modelada, con las respectivas líneas y frecuencias que hacen uso de cada estación:

❖ Av. Fray Vicente Solano N-S:



❖ Av. Fray Vicente Solano S-N:



❖ Av. 24 de Mayo S-N:

The screenshot shows a map on the left and a configuration window on the right. The map displays a road network with a highlighted bus stop area in red and yellow. The configuration window is titled "Parada de Transporte Público: 698, Nombre: Av. 24 de Mayo S-N (Capa: Network) (9096bce0-32...".

Configuration Window Details:

- Principal Tab:**
 - Nombre: Av. 24 de Mayo S-N
 - ID Externo: [Empty]
 - Tipo: Normal
 - Capacidad: 0 veh
 - Distancia de Visibilidad: 200.0 m
 - El Vehículo ha de Caber Entero en la Parada para Parar
 - Modo de Dibujado 3D: Como Parada de Autobús
- Usada en las Líneas:**
 - 728: Línea 25 Jaime Roldos
- Información:**
 - Longitud: 15.0 m
 - Distancia desde la Entrada: 12.2 m
 - Distancia a la Salida: 4.4 m

Buttons: Ayuda, Aceptar, Cancelar.

❖ Av. 24 de Mayo N-S:

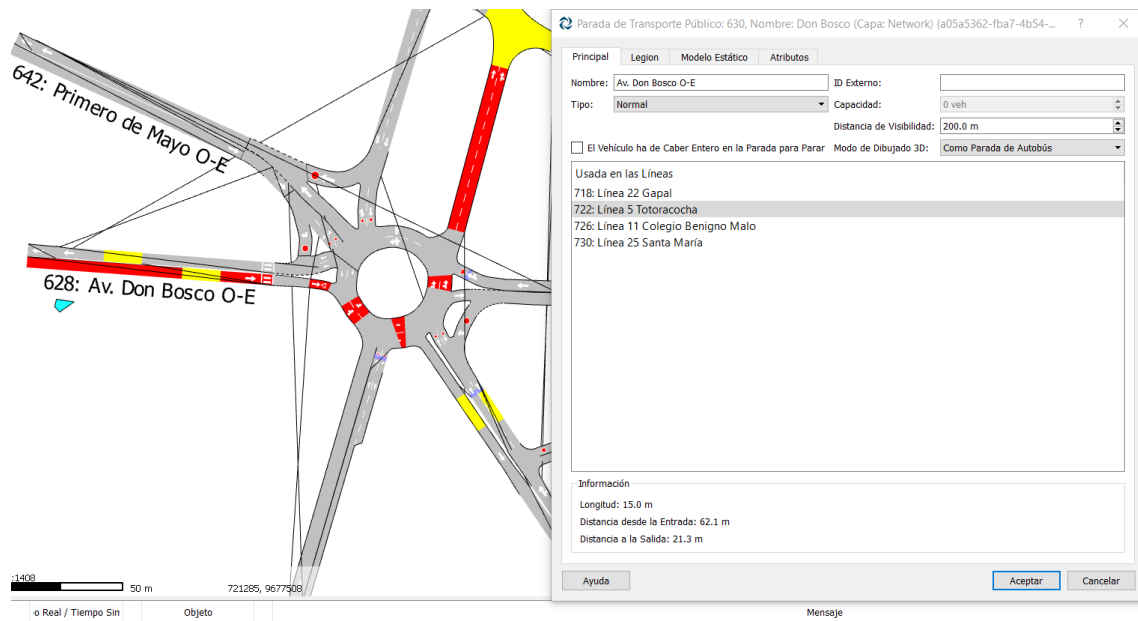
The screenshot shows a map on the left and a configuration window on the right. The map displays a road network with a highlighted bus stop area in red and yellow. The configuration window is titled "Parada de Transporte Público: 699, Nombre: 24 de Mayo (Capa: Network) (414af07b-4cb2-449a...".

Configuration Window Details:

- Principal Tab:**
 - Nombre: Av. 24 de Mayo N-S
 - ID Externo: [Empty]
 - Tipo: Normal
 - Capacidad: 0 veh
 - Distancia de Visibilidad: 200.0 m
 - El Vehículo ha de Caber Entero en la Parada para Parar
 - Modo de Dibujado 3D: Como Parada de Autobús
- Usada en las Líneas:**
 - 724: Línea 11 Carcel
 - 730: Línea 25 Santa María
- Información:**
 - Longitud: 15.0 m
 - Distancia desde la Entrada: 25.7 m
 - Distancia a la Salida: 17.6 m

Buttons: Ayuda, Aceptar, Cancelar.

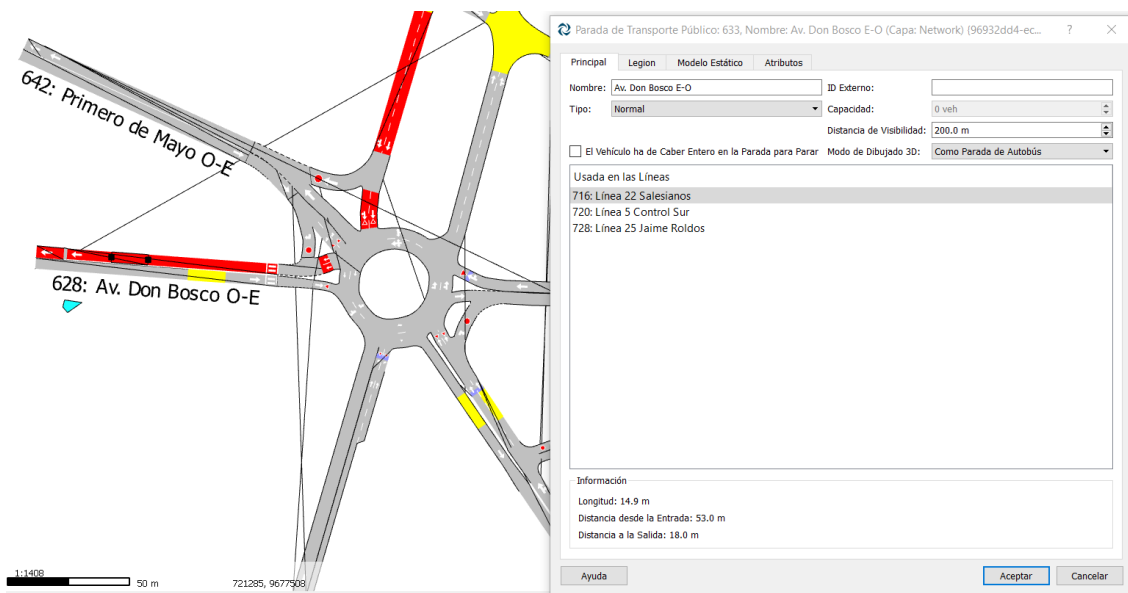
❖ Av. Don Bosco O-E:



The screenshot shows a map of a road intersection with a public transport stop highlighted in red. The stop is labeled '628: Av. Don Bosco O-E'. The attribute window for this stop is open, showing the following details:

- Nombre:** Av. Don Bosco O-E
- ID Externo:** (empty)
- Tipo:** Normal
- Capacidad:** 0 veh
- Distancia de Visibilidad:** 200.0 m
- El Vehículo ha de Caber Entero en la Parada para Parar
- Modo de Dibujado 3D:** Como Parada de Autobús
- Usada en las Líneas:**
 - 718: Línea 22 Gapal
 - 722: Línea 5 Totoracocha
 - 726: Línea 11 Colegio Benigno Malo
 - 730: Línea 25 Santa María
- Información:**
 - Longitud: 15.0 m
 - Distancia desde la Entrada: 62.1 m
 - Distancia a la Salida: 21.3 m

❖ Av. Don Bosco E-O:



The screenshot shows a map of a road intersection with a public transport stop highlighted in red. The stop is labeled '628: Av. Don Bosco O-E'. The attribute window for this stop is open, showing the following details:

- Nombre:** Av. Don Bosco E-O
- ID Externo:** (empty)
- Tipo:** Normal
- Capacidad:** 0 veh
- Distancia de Visibilidad:** 200.0 m
- El Vehículo ha de Caber Entero en la Parada para Parar
- Modo de Dibujado 3D:** Como Parada de Autobús
- Usada en las Líneas:**
 - 716: Línea 22 Salesianos
 - 720: Línea 5 Control Sur
 - 728: Línea 25 Jaime Roldos
- Información:**
 - Longitud: 14.9 m
 - Distancia desde la Entrada: 53.0 m
 - Distancia a la Salida: 18.0 m

2.3.2 Líneas de transporte público:

Al incorporar estas 6 estaciones de transporte público, se ha podido incluir en el modelo la influencia de las 8 líneas de transporte público que brindan servicio en este sector:

- ▼ **TRANSPORTE PÚBLICO**
 - ▼ **Líneas de Transporte Público**
 - 🚌 Línea 5 Control Sur
 - 🚌 Línea 5 Totoracochoa
 - 🚌 Línea 11 Carcel
 - 🚌 Línea 11 Colegio Benigno Malo
 - 🚌 Línea 22 Gapal
 - 🚌 Línea 22 Salesianos
 - 🚌 Línea 25 Jaime Roldos
 - 🚌 Línea 25 Santa María

A cada una de estas líneas de transporte público, le han sido asignadas sus características correspondientes como: recorrido, estaciones que utiliza, frecuencia, tiempos de parada, etc.

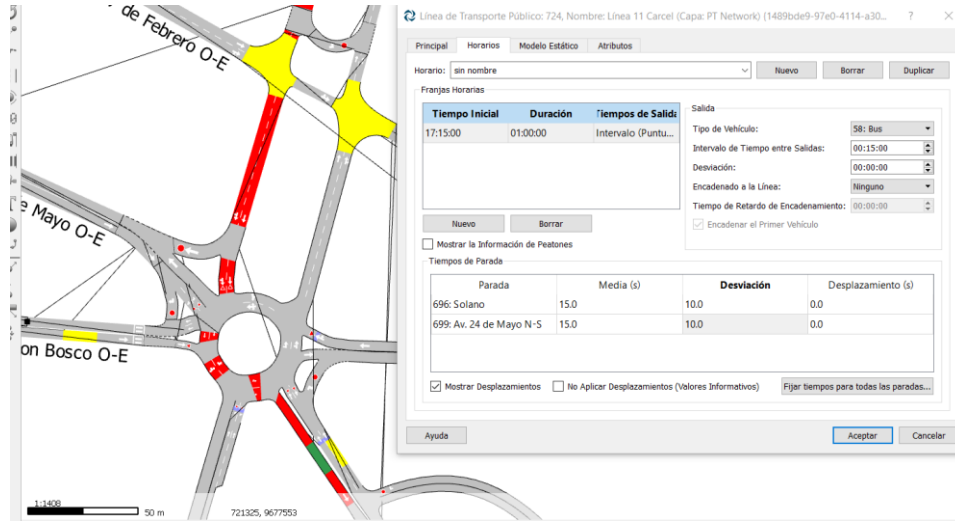
❖ **Línea 5 – Control Sur:**

Tiempo Inicial	Duración	Tiempos de Salida													
17:15:00	01:00:00	Intervalo (Puntu...													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parada</th> <th>Media (s)</th> <th>Desviación</th> <th>Desplazamiento (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>696: Solano</td> <td>15,0</td> <td>10,0</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>633: Av. Don Bosco E-O</td> <td>15,0</td> <td>10,0</td> <td>0,0</td> </tr> </tbody> </table>				Parada	Media (s)	Desviación	Desplazamiento (s)	696: Solano	15,0	10,0	0,0	633: Av. Don Bosco E-O	15,0	10,0	0,0
Parada	Media (s)	Desviación	Desplazamiento (s)												
696: Solano	15,0	10,0	0,0												
633: Av. Don Bosco E-O	15,0	10,0	0,0												

❖ **Línea 5 – Totoracochoa:**

Tiempo Inicial	Duración	Tiempos de Salida													
17:15:00	01:00:00	Intervalo (Puntu...													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Parada</th> <th>Media (s)</th> <th>Desviación</th> <th>Desplazamiento (s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>630: Av. Don Bosco O-E</td> <td>15,0</td> <td>0,0</td> <td>0,0</td> </tr> <tr> <td>697: Solano</td> <td>15,0</td> <td>0,0</td> <td>0,0</td> </tr> </tbody> </table>				Parada	Media (s)	Desviación	Desplazamiento (s)	630: Av. Don Bosco O-E	15,0	0,0	0,0	697: Solano	15,0	0,0	0,0
Parada	Media (s)	Desviación	Desplazamiento (s)												
630: Av. Don Bosco O-E	15,0	0,0	0,0												
697: Solano	15,0	0,0	0,0												

❖ Línea 11 – Cárcel:



Línea de Transporte Público: 724, Nombre: Línea 11 Cárcel (Capa: PT Network) (1489bde9-97e0-4114-a30...)

Principal | Horarios | Modelo Estático | Atributos

Horario: sin nombre [Nuevo] [Borrar] [Duplicar]

Frangos Horarios

Tiempo Inicial	Duración	Tiempos de Salida	Salida
17:15:00	01:00:00	Intervalo (Puntu...	Tipo de Vehículo: 58: Bus Intervalo de Tiempo entre Salidas: 00:15:00 Desviación: 00:00:00 Encadenado a la Línea: Ninguno Tiempo de Retardo de Encadenamiento: 00:00:00 <input checked="" type="checkbox"/> Encadenar el Primer Vehículo

[Nuevo] [Borrar]

Mostrar la Información de Peatones

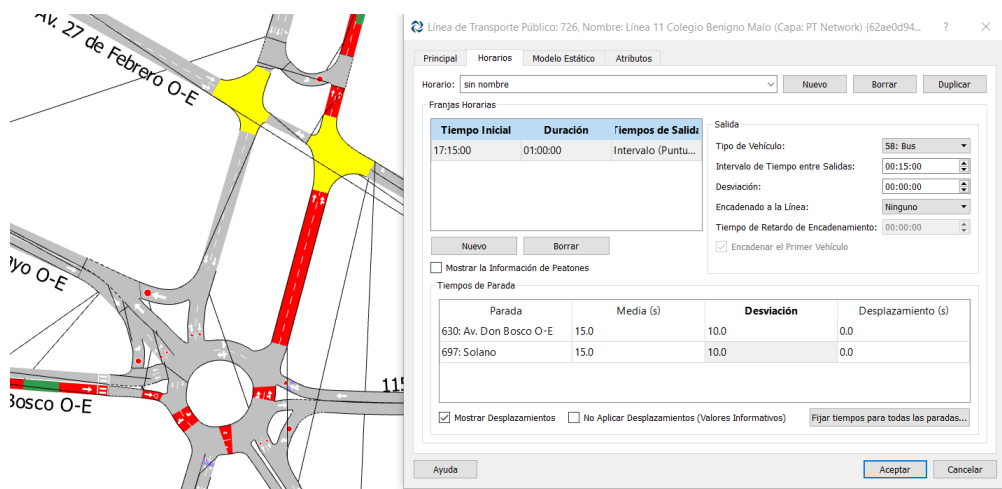
Tiempos de Parada

Parada	Media (s)	Desviación	Desplazamiento (s)
696: Solano	15.0	10.0	0.0
699: Av. 24 de Mayo N-S	15.0	10.0	0.0

Mostrar Desplazamientos No Aplicar Desplazamientos (Valores Informativos) [Fijar tiempos para todas las paradas...]

[Ayuda] [Aceptar] [Cancelar]

❖ Línea 11 – Colegio benigno Malo:



Línea de Transporte Público: 726, Nombre: Línea 11 Colegio Benigno Malo (Capa: PT Network) (62ae0d94...)

Principal | Horarios | Modelo Estático | Atributos

Horario: sin nombre [Nuevo] [Borrar] [Duplicar]

Frangos Horarios

Tiempo Inicial	Duración	Tiempos de Salida	Salida
17:15:00	01:00:00	Intervalo (Puntu...	Tipo de Vehículo: 58: Bus Intervalo de Tiempo entre Salidas: 00:15:00 Desviación: 00:00:00 Encadenado a la Línea: Ninguno Tiempo de Retardo de Encadenamiento: 00:00:00 <input checked="" type="checkbox"/> Encadenar el Primer Vehículo

[Nuevo] [Borrar]

Mostrar la Información de Peatones

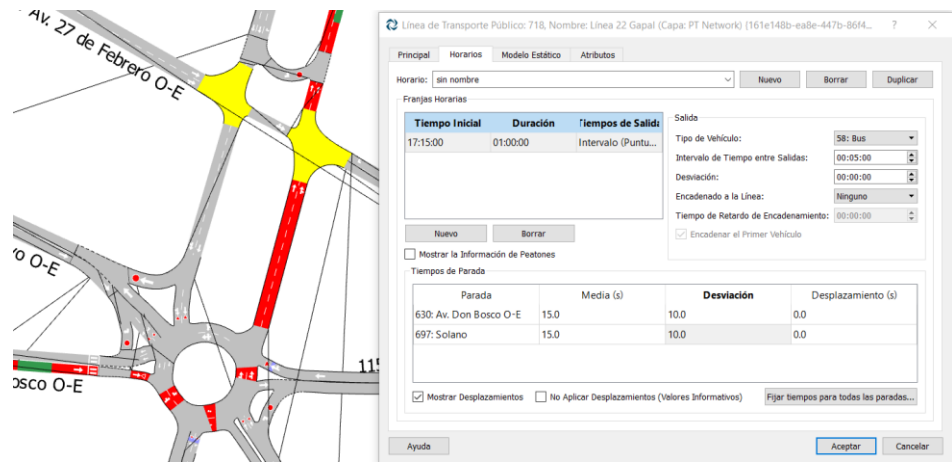
Tiempos de Parada

Parada	Media (s)	Desviación	Desplazamiento (s)
630: Av. Don Bosco O-E	15.0	10.0	0.0
697: Solano	15.0	10.0	0.0

Mostrar Desplazamientos No Aplicar Desplazamientos (Valores Informativos) [Fijar tiempos para todas las paradas...]

[Ayuda] [Aceptar] [Cancelar]

❖ Línea 22 – Galpal:

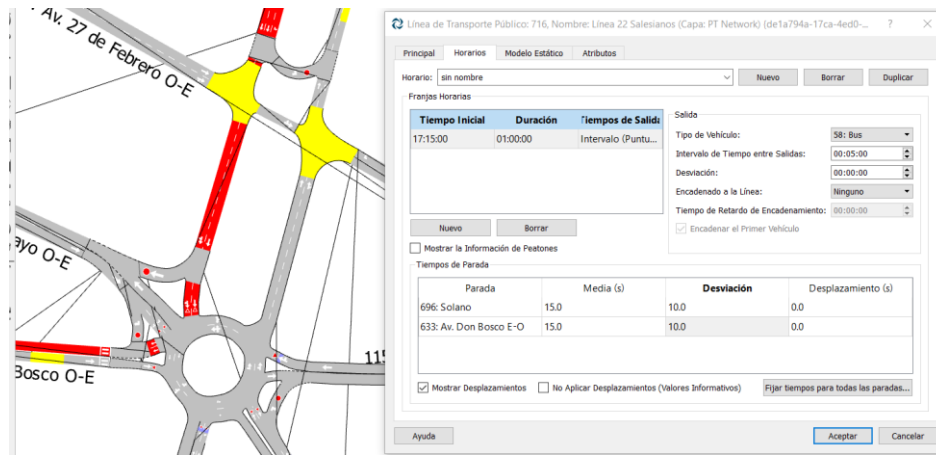


The image shows a map of a road network with a highlighted red line representing the bus route. The map includes labels for 'Av. 27 de Febrero O-E', 'Don Bosco O-E', and '11'. To the right is a software window titled 'Línea de Transporte Público: 718, Nombre: Línea 22 Galpal'. The window has tabs for 'Principal', 'Horarios', 'Modelo Estático', and 'Atributos'. The 'Horarios' tab is active, showing a table for 'Franjas Horarias' with columns for 'Tiempo Inicial', 'Duración', and 'Tiempo de Salida'. Below this is a 'Salida' section with dropdown menus for 'Tipo de Vehículo' (58: Bus), 'Intervalo de Tiempo entre Salidas' (00:05:00), 'Desviación' (00:00:00), and 'Encadenado a la Línea' (Ninguno). There is also a checkbox for 'Encadenar el Primer Vehículo'. A 'Tiempo de Parada' table is shown below, with columns for 'Parada', 'Media (s)', 'Desviación', and 'Desplazamiento (s)'. The table lists two stops: '630: Av. Don Bosco O-E' and '697: Solano'. At the bottom, there are checkboxes for 'Mostrar Desplazamientos' and 'No Aplicar Desplazamientos (Valores Informativos)', and a button 'Fijar tiempos para todas las paradas...'. The window ends with 'Ayuda', 'Aceptar', and 'Cancelar' buttons.

Tiempo Inicial	Duración	Tiempo de Salida
17:15:00	01:00:00	Intervalo (Puntu...

Parada	Media (s)	Desviación	Desplazamiento (s)
630: Av. Don Bosco O-E	15.0	10.0	0.0
697: Solano	15.0	10.0	0.0

❖ Línea 22 – Salesianos:

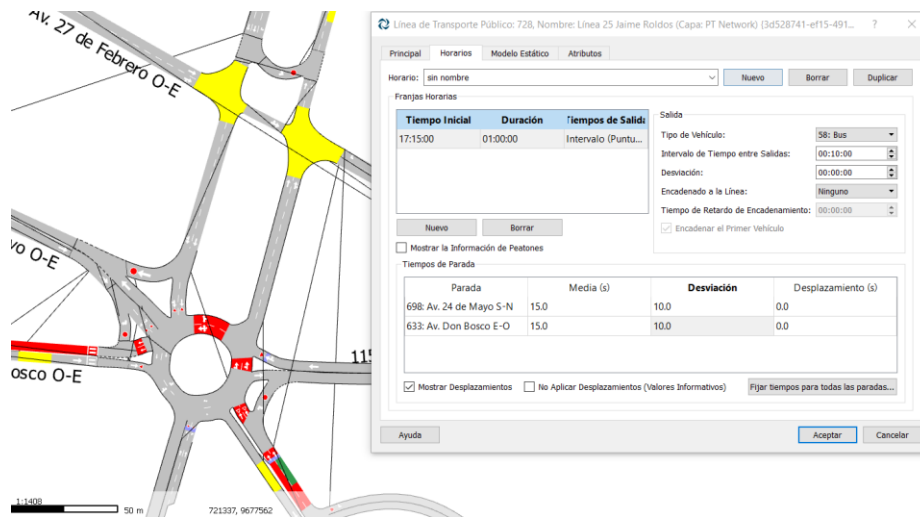


The image shows a map of a road network with a highlighted red line representing the bus route. The map includes labels for 'Av. 27 de Febrero O-E', 'Don Bosco O-E', and '11'. To the right is a software window titled 'Línea de Transporte Público: 716, Nombre: Línea 22 Salesianos'. The window has tabs for 'Principal', 'Horarios', 'Modelo Estático', and 'Atributos'. The 'Horarios' tab is active, showing a table for 'Franjas Horarias' with columns for 'Tiempo Inicial', 'Duración', and 'Tiempo de Salida'. Below this is a 'Salida' section with dropdown menus for 'Tipo de Vehículo' (58: Bus), 'Intervalo de Tiempo entre Salidas' (00:05:00), 'Desviación' (00:00:00), and 'Encadenado a la Línea' (Ninguno). There is also a checkbox for 'Encadenar el Primer Vehículo'. A 'Tiempo de Parada' table is shown below, with columns for 'Parada', 'Media (s)', 'Desviación', and 'Desplazamiento (s)'. The table lists two stops: '696: Solano' and '633: Av. Don Bosco E-O'. At the bottom, there are checkboxes for 'Mostrar Desplazamientos' and 'No Aplicar Desplazamientos (Valores Informativos)', and a button 'Fijar tiempos para todas las paradas...'. The window ends with 'Ayuda', 'Aceptar', and 'Cancelar' buttons.

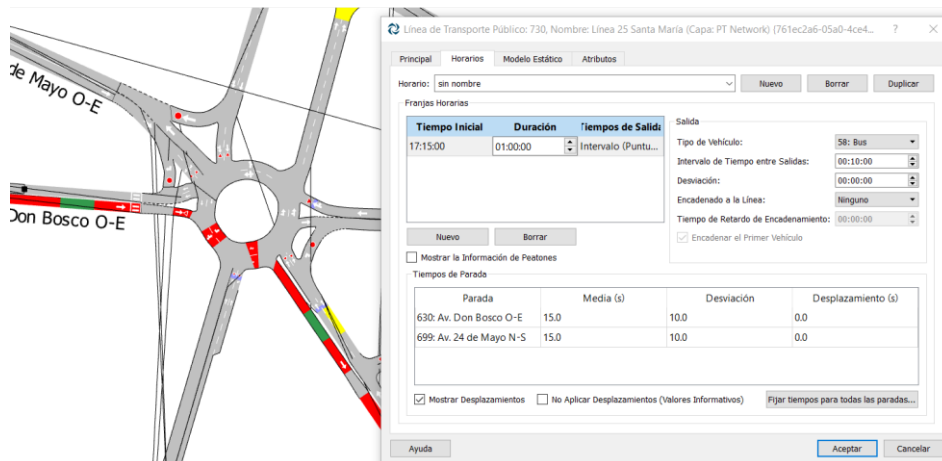
Tiempo Inicial	Duración	Tiempo de Salida
17:15:00	01:00:00	Intervalo (Puntu...

Parada	Media (s)	Desviación	Desplazamiento (s)
696: Solano	15.0	10.0	0.0
633: Av. Don Bosco E-O	15.0	10.0	0.0

❖ Línea 25 – Jaime Roldós:



❖ Línea 25 – Santa María:



2.3.3 Estados de tráfico:

En virtud de la información proporcionada por la Dirección General de Gestión de Movilidad del Municipio de Cuenca, se ha determinado que la Hora de Máxima Demanda en la Rotonda de los Tres Puentes, corresponde a la franja horaria entre las 17h15 y 18h15, en donde se han presentado las condiciones de circulación más desfavorables con tiempos de demora prolongados para sus accesos. Por lo tanto, a continuación, se detalla la demanda de los distintos medios de transporte que confluyen a este entorno:

❖ Vehículos livianos:

Estado de Tráfico: 694, Nombre: LIVIANOS [42dd4655-eb1d-42cb-b905-c23b0768c0d9]

Principal Parámetros

Nombre: LIVIANOS ID Externo:

Tipo de Vehículo: 53: Car Propósito de Viaje: Ninguno

Cabeceras: ID: Nombre (ID Externo) Desde: 05:15:00 P. M. Duración: 01:00:00

Flujo de entrada Información del Giro

Mostrar sólo Entradas Copiar Pegar Calcular Flujos usando Flujos de los Giros Usar Giros de Entrada

Sección	Flujo (veh/h)	Mantener Porcentajes de Flujo
628: Av. Don Bosco O-E	747	0
642: Primero de Mayo O-E	467	0
649: Av. 27 de Febrero E-O	100	0
650: Av. 27 de Febrero O-E	300	0
651: Av. Fray Vicente Solano N-S	1050	0
874: Av. 24 de Mayo S-N	812	0
912: Paseo Río Tarqui O-E	20	0
1156: Jose Ortega Gasset S-N	413	0
1159: Paseo Río Yanuncay E-O	116	0

Ayuda Aceptar Cancelar

Estado de Tráfico: 694, Nombre: LIVIANOS [42dd4655-eb1d-42cb-b905-c23b0768c0d9]

Principal Parámetros

Nombre: LIVIANOS ID Externo:

Tipo de Vehículo: 53: Car Propósito de Viaje: Ninguno

Cabeceras: ID: Nombre (ID Externo) Desde: 05:15:00 P. M. Duración: 01:00:00

Flujo de entrada Información del Giro

Resaltar definiciones incorrectas Copiar Pegar Usar Giros de Entrada

Mostrar Todas las Secciones Recalcular Porcentajes de Giro usando los Flujos de Salida

Secciones del Giro	Porcentaje de Giro	Flujo en el Giro (veh/h)
559: Av. Solano S-N hasta 664: Av. Solano S-N	76	0
559: Av. Solano S-N hasta 648: Av. 27 de Febrero O-E	24	0
561 hasta 612: Redondel	75	0
561 hasta 617: Av. Don Bosco E-O	25	0
565: Primero de Mayo O-E hasta 637: Primero de Mayo O-E	2	0
565: Primero de Mayo O-E hasta 615: Primero de Mayo O-E	98	0
569: Av. Fray Vicente Solano N-S hasta 566: Primero de Mayo E-O	20	0
569: Av. Fray Vicente Solano N-S hasta 561	80	0
579: Av. 24 de Mayo S-N hasta 587: Av. 24 de Mayo S-N	99	0
579: Av. 24 de Mayo S-N hasta 589: Av. 24 de Mayo S-N	1	0
591: Av. Don Bosco E-O hasta 604: Av. Don Bosco E-O	49	0

Ayuda Aceptar Cancelar

❖ Vehículos pesados:

Estado de Tráfico: 695, Nombre: PESADOS (400ab108-4d80-4567-bd29-50c6be23988e)

Principal **Parámetros**

Nombre: PESADOS ID Externo:

Tipo de Vehículo: 56: Truck Propósito de Viaje: Ninguno

Cabeceras: ID: Nombre (ID Externo) Desde: 05:15:00 P. M. Duración: 01:00:00

Flujo de entrada Información del Giro

Mostrar sólo Entradas

Sección	Flujo (veh/h)	Mantener Porcentajes de Flujo
628: Av. Don Bosco O-E	10	0
642: Primero de Mayo O-E	5	0
649: Av. 27 de Febrero E-O	0	0
650: Av. 27 de Febrero O-E	0	0
651: Av. Fray Vicente Solano N-S	15	0
874: Av. 24 de Mayo S-N	10	0
912: Paseo Río Tarquí O-E	0	0
1156: Jose Ortega Gasset S-N	5	0
1159: Paseo Río Yanuncay E-O	2	0

Estado de Tráfico: 695, Nombre: PESADOS (400ab108-4d80-4567-bd29-50c6be23988e)

Principal **Parámetros**

Nombre: PESADOS ID Externo:

Tipo de Vehículo: 56: Truck Propósito de Viaje: Ninguno

Cabeceras: ID: Nombre (ID Externo) Desde: 05:15:00 P. M. Duración: 01:00:00

Flujo de entrada Información del Giro

Resaltar definiciones incorrectas

Mostrar Todas las Secciones

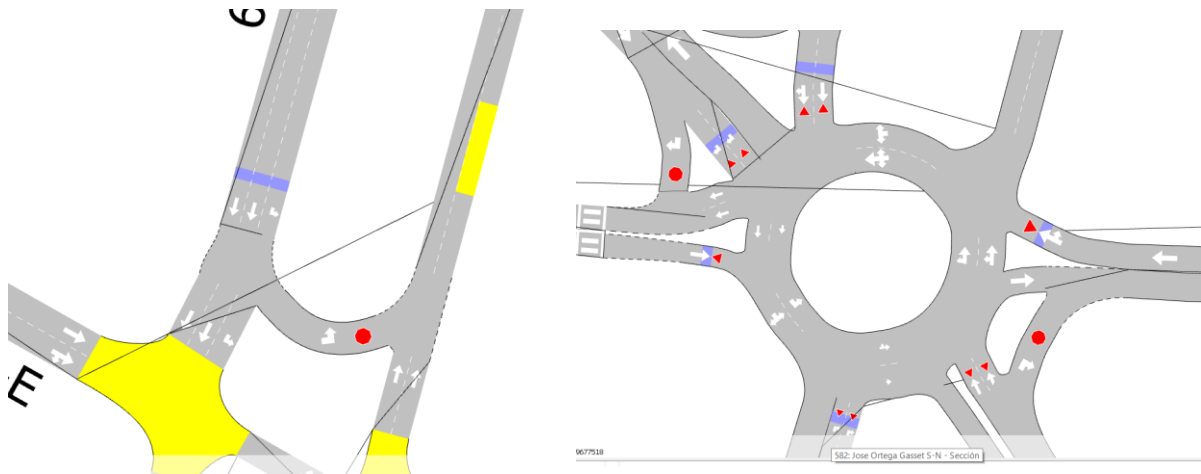
Secciones del Giro	Porcentaje de Giro	Flujo en el Giro (veh/h)
608: Av. Don Bosco E-O hasta 617: Av. Don Bosco E-O		
650: Av. 27 de Febrero O-E hasta 654: Av. 27 de Febrero O-E	50	0
650: Av. 27 de Febrero O-E hasta 569: Av. Fray Vicente Solano N-S	50	0
651: Av. Fray Vicente Solano N-S hasta 663: Av. Fray Vicente Sola...	95	0
651: Av. Fray Vicente Solano N-S hasta 653: Fray Vicene Solano	5	0
654: Av. 27 de Febrero O-E hasta 648: Av. 27 de Febrero O-E	50	0
654: Av. 27 de Febrero O-E hasta 664: Av. Solano S-N	50	0
663: Av. Fray Vicente Solano N-S hasta 569: Av. Fray Vicente Sola...	100	0
663: Av. Fray Vicente Solano N-S hasta 654: Av. 27 de Febrero O-E	0	0
874: Av. 24 de Mayo S-N hasta 579: Av. 24 de Mayo S-N	95	0
874: Av. 24 de Mayo S-N hasta 867: Paseo Río Tarquí O-E	5	0

3. Calibración y Validación del modelo:

Para garantizar la integridad técnica y la fiabilidad del estudio, en el modelo de microsimulación se ajustan distintas variables del comportamiento vehicular (tiempos de reacción, distancias de seguridad y agresividad), permitiendo replicar las condiciones operativas reales de la red; recolectar sus datos y mediante validación estadística, comparar los resultados del modelo frente a los datos observados en campo.

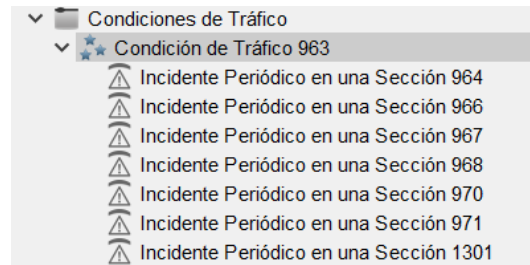
3.1 Metodología:

- La información que ha sido levantado en campo, es cargada al modelo como un conjunto de datos reales.
- Se crean “detectores” en las mismas ubicaciones de la red en las que se colocaron las estaciones de levantamiento de información.



- Se almacenan los atributos de flujo, velocidad, densidad, etc, de cada replicación y de su media.
- Se generan estadísticos de validación (GEH), y gráficos de regresión para compararlos con el conjunto de datos reales.
- Se realizan las calibraciones (ajustes en el modelo), en los accesos que requieran hasta obtener los valores más cercanos al conjunto de datos reales.
- En este modelo, se ha utilizado la herramienta de “incidentes periódicos”, que han permitido representar en las simulaciones, ciertas particularidades que afectan na las condiciones de circulación del entorno.

- Dentro de este contexto, se han implementado 7 incidentes periodicos, que han permitido ajustar el modelo y acercarlo a la realidad.

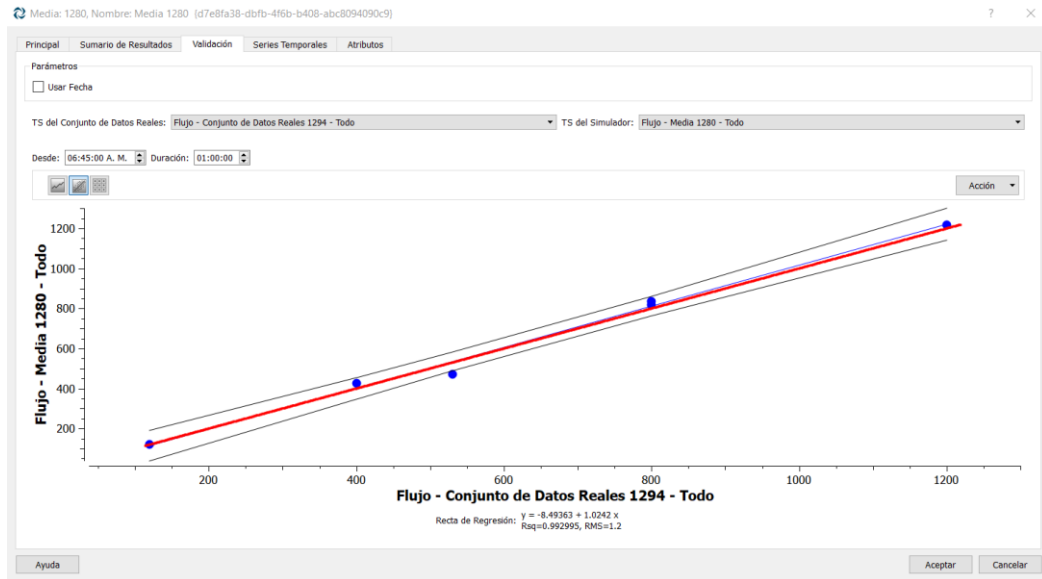


- En todas las salidas de la red simulada, se han implementado incidentes periódicos que representen las omisiones que los usuarios cometen ante las restricciones de estacionamiento existentes, ya que en reiteradas ocasiones se detienen, estacionan, recogen pasajeros, rebasan lo que entorpece el funcionamiento del sistema.
- De igual forma, se ha implementado un incidente periódico en el acceso de la Av. Fray Vicente Solano hacia la rotonda, ya que se han implementado dispositivos semafóricos peatonales actuados, es decir que no son de tiempo fijo; y son susceptibles a la demanda peatonal y reiterativos durante la hora de máxima demanda.
- Todas estas herramientas, han permitido calibrar el modelo y alcanzar los resultados que se mostrarán a continuación.

3.2 Resultados de Validación:

Los indicadores estadísticos muestran una excelente correlación entre el estado de tráfico real en la hora de máxima demanda y la simulación.

- **Coefficiente de Determinación ($R^2 = 0.993$):** Indica que el 99.3% de la variabilidad de los datos es explicada por el modelo.
- **Pendiente ($m = 1.024$):** Señala que el modelo estima en promedio un 2.42% ($1.024 - 1=0.242$), más de tráfico que la realidad, siendo capaz de replicar la magnitud de los flujos 1 a 1.
- **Error (RMS=1.2):** Confirma que la dispersión de los datos respecto a la línea de tendencia es mínima.



Otro indicador de validación, que se calculó es el estadístico GEH para cada punto de control, cuyos resultados, ante la ausencia de normativa local, han sido comparados con la FHWA (Administración Federal de Carreteras de EEUU) y el DMRB (Manual de Diseño de Carreteras y Puentes de Reino Unido), referentes técnicos a nivel mundial que exigen que el 85% de los casos presenten un GEH < 5.0.

El modelo desarrollado tiene la totalidad de los pares de datos analizados (detectores y giros) con un valor GEH inferior a 5.0, validando que no existen puntos críticos con errores de asignación de flujo.

Con esta información, se puede establecer que el modelo es apto y se encuentra calibrado, garantizando que las evaluaciones de propuestas futuras se basarán en una fiel representación de la realidad operativa actual.

Media: 1280, Nombre: Media 1280 (d7e8fa38-dbf6-4f6b-b408-abc8094090c9)

Principal Sumario de Resultados Validación Series Temporales Atributos

Parámetros
 Usar Fecha

TS del Conjunto de Datos Reales: Flujo - Conjunto de Datos Reales 1294 - Todo TS del Simulador: Flujo - Media 1280 - Todo

Desde: 06:45:00 A. M. Duración: 01:00:00

Acción

Objeto	Flujo - Conjunto de Datos Reales 1294 - Todo	Flujo - Media 1280 - Todo	Diferencia Absoluta	Diferencia Relativa (%)	GEH
625: Acceso Paseo Río Yanuncay	120	121.1	1.1	0.916667	0.100186
584: Acceso José Ortega y Gasset	400	426.9	26.9	6.725	1.32294
580: Acceso Av. 24 de Mayo	800	817.5	17.5	2.1875	0.615362
1303: Acceso Solano a semáforo	1200	1216.3	16.3	1.35833	0.468951
1299: Acceso Av. Primero de Mayo	530	473.1	-56.9	-10.7358	2.54071
1298: Acceso Av. Solano	800	837.3	37.3	4.6625	1.30365
Media	641.667	648.7	7.03333	1.0961	1.05863

Sumario de GEH
 Número de objetos: 6 Número de objetos con GEH < 5: 6 (100.00%) Número de objetos con GEH < 10: 6 (100.00%)

Ayuda Aceptar Cancelar







4. Diagnóstico de la Situación Actual (2025)

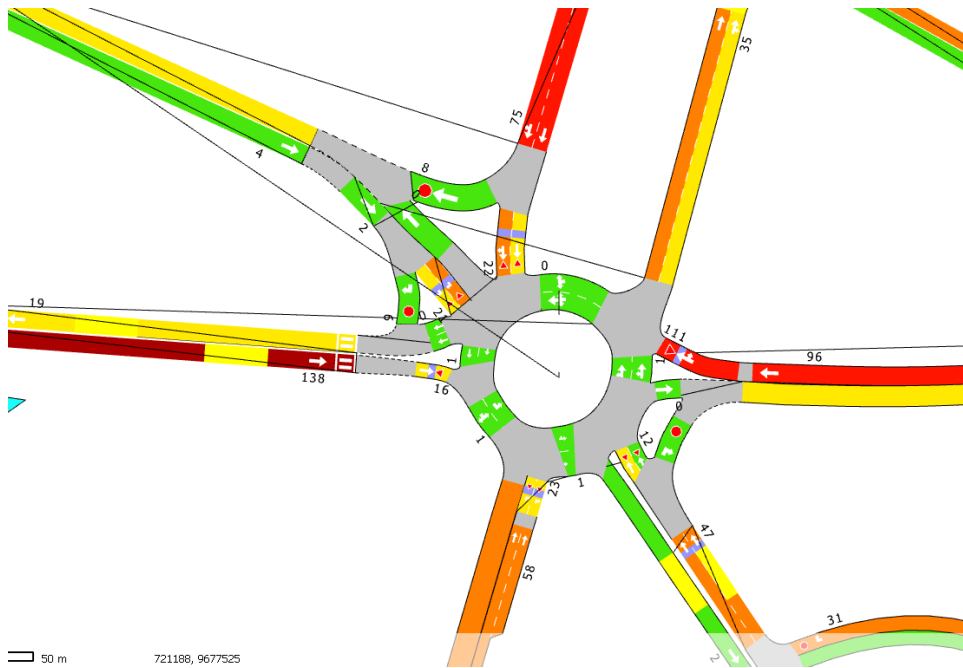
4.1 Tiempos de demora – Niveles de Servicio:

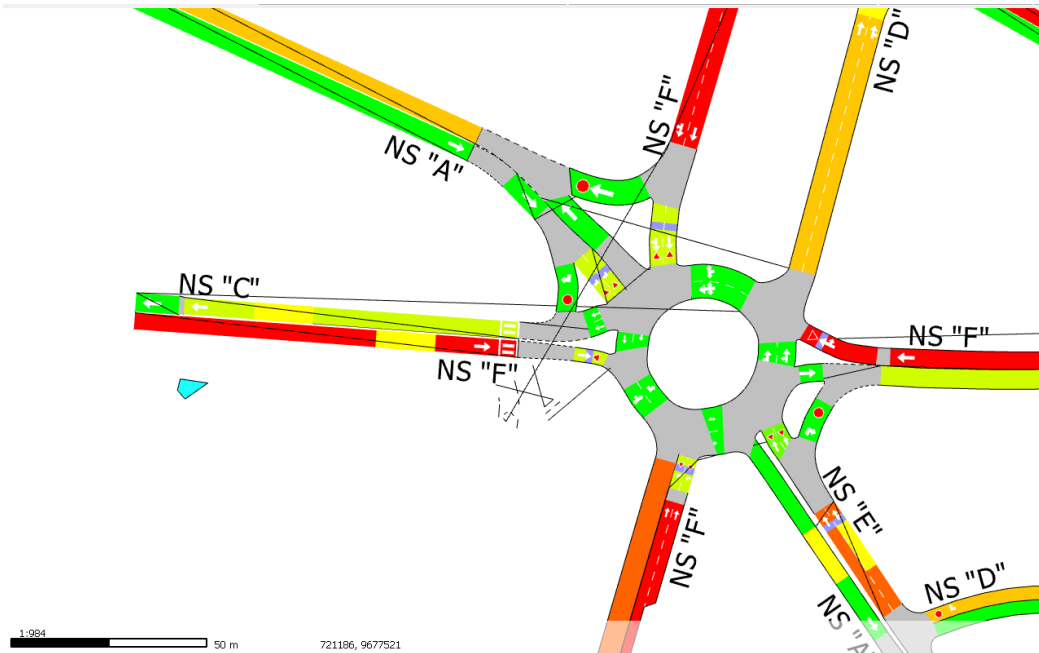
En el software se han obtenido los tiempos de demora (segundos), para cada una de las secciones que se han generado para desarrollar el modelo, sin embargo, es necesario indicar que para nuestro análisis se deberán tomar en cuenta los tiempos de demora que representen a todo el tramo de acceso a la rotonda o a la intersección semaforizada, en lugar de los valores generados para cada sección.

También es oportuno indicar, que los niveles de servicio tanto para rotondas como para intersecciones semaforizadas, tienen distintas escalas de clasificación, en función del tiempo de demora.

• Rotonda:

Símbolo	Rango	LOS "A"
	0.00 - 10.00	LOS "A"
	10.00 - 15.00	LOS "B"
	15.00 - 25.00	LOS "C"
	25.00 - 35.00	LOS "D"
	35.00 - 50.00	LOS "E"
	50.00 - inf	LOS "F"





Obteniéndose una demora promedio de 73 segundos, la rotonda se encuentra en Nivel de Servicio "F".

- **Intersección semaforizada:**

Estilo de Vista: 0, Tipo Sección, Atributo Tiempo de Demora - Último Generado - Todo

Principal Condiciones

Nombre: NIVEL DE SERVICIO REDONDELES ID Externo:

Objetos de Tipo: Sección Estilo: Color

Atributo: Tiempo de Demora Último Generado Todo (todos los Carriles) Normalizar

Dividido por: Ninguno

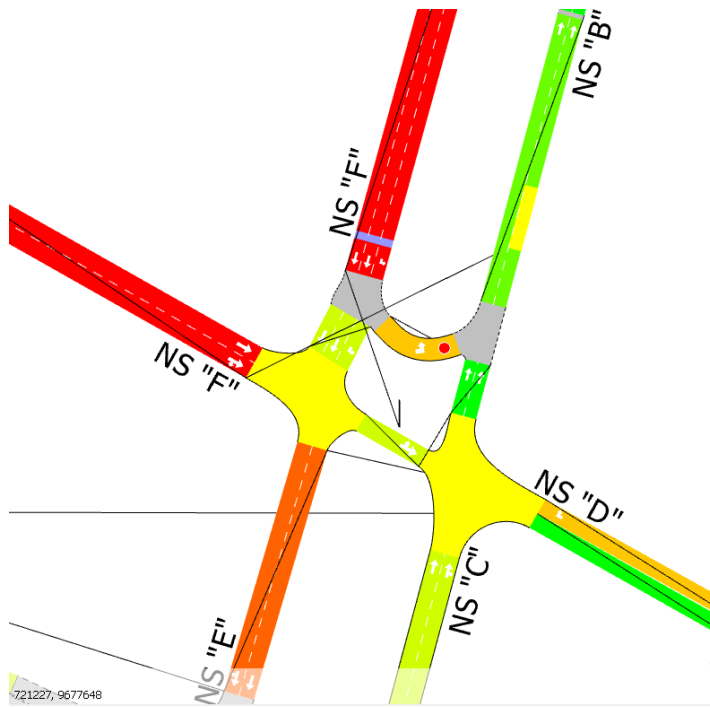
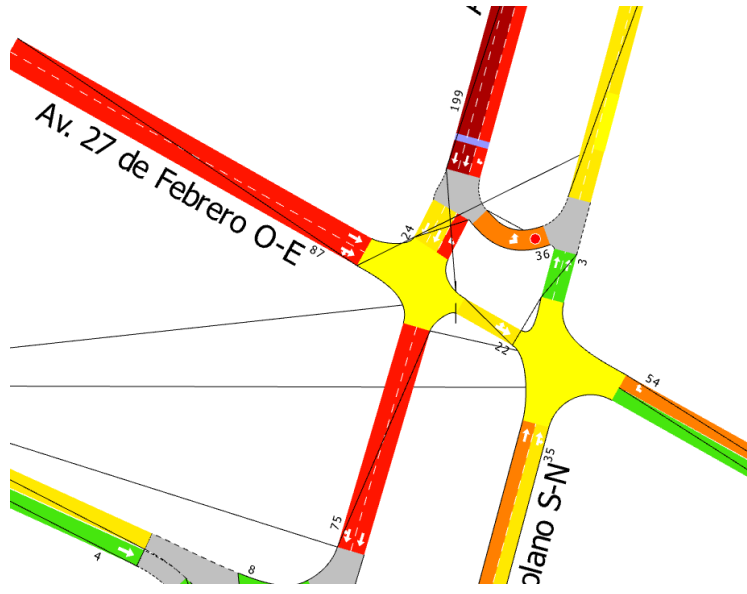
Continuo Discreto Unidades de Tamaño: pixeles Formato: 1 Decimal

Símbolo	Rango	Etiqueta
	0.00 - 10.00	NS "A"
	10.00 - 20.00	NS "B"
	20.00 - 35.00	NS "C"
	35.00 - 55.00	NS "D"
	55.00 - 80.00	NS "E"
	80.00 - inf	NS "F"

Editor de Símbolos

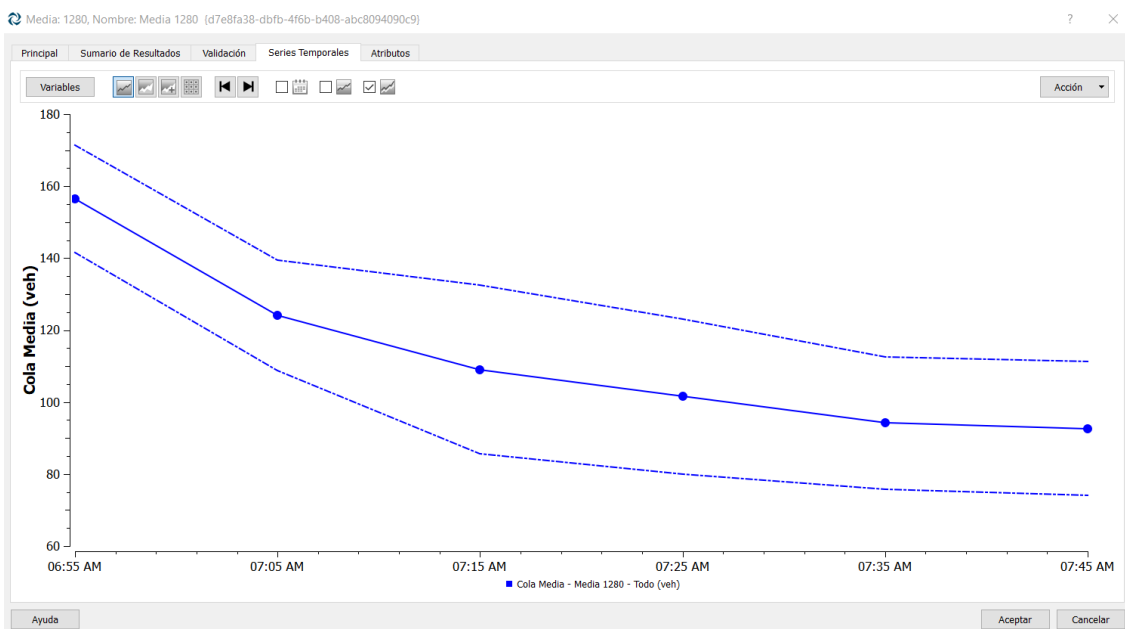
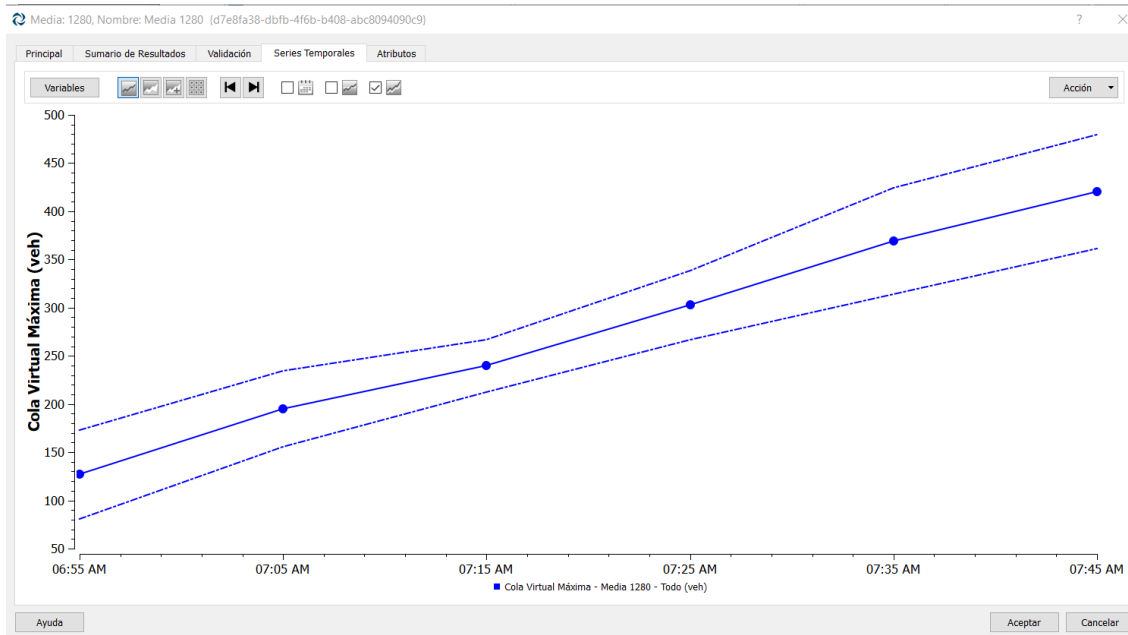
Color: Escala de Colores: No usar la Escala de Colores

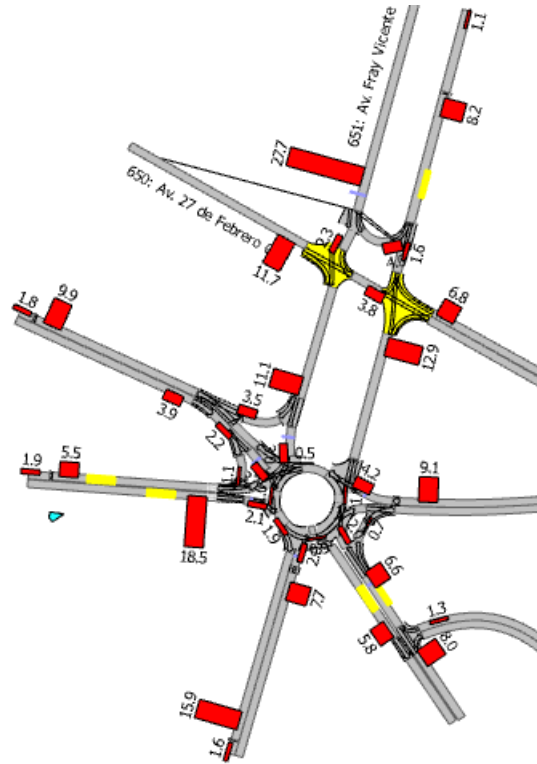
Ayuda



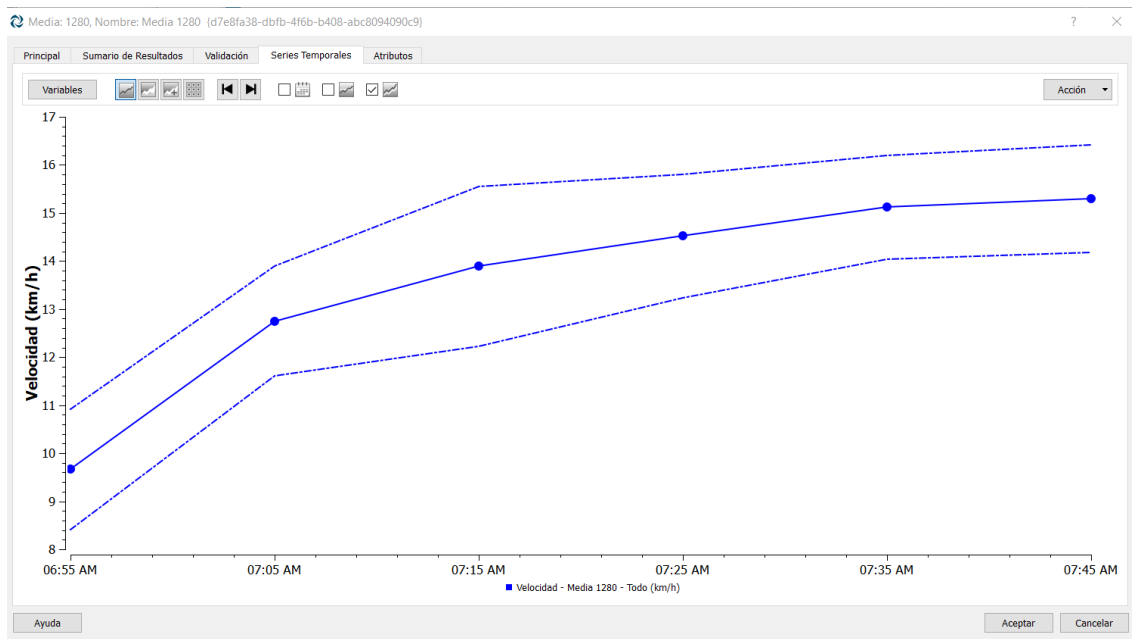
Por su parte, la intersección regulada con dispositivos semafóricos tiene una demora promedio de 143 segundos, encontrándose en un Nivel de Servicio “F”.

4.2 Longitud media, máxima y cola vertical (veh):





4.3 Velocidad promedio de la red:

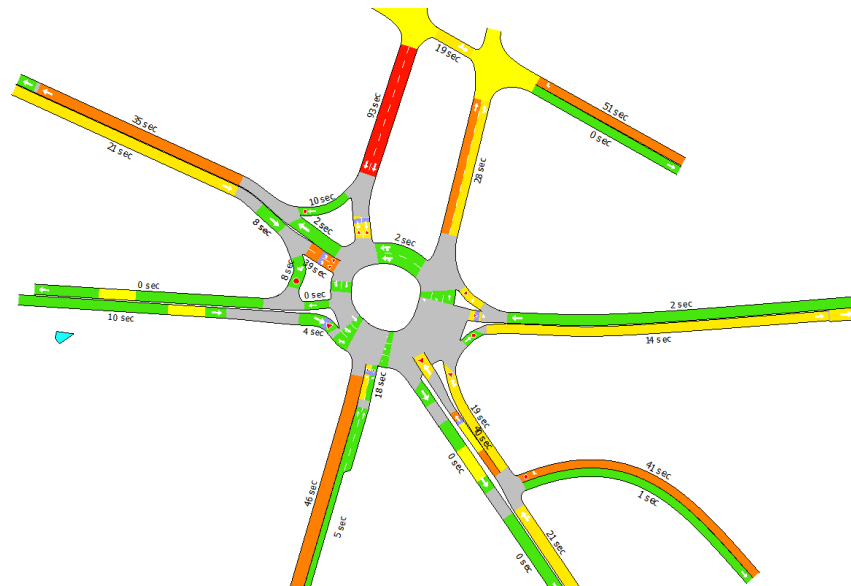


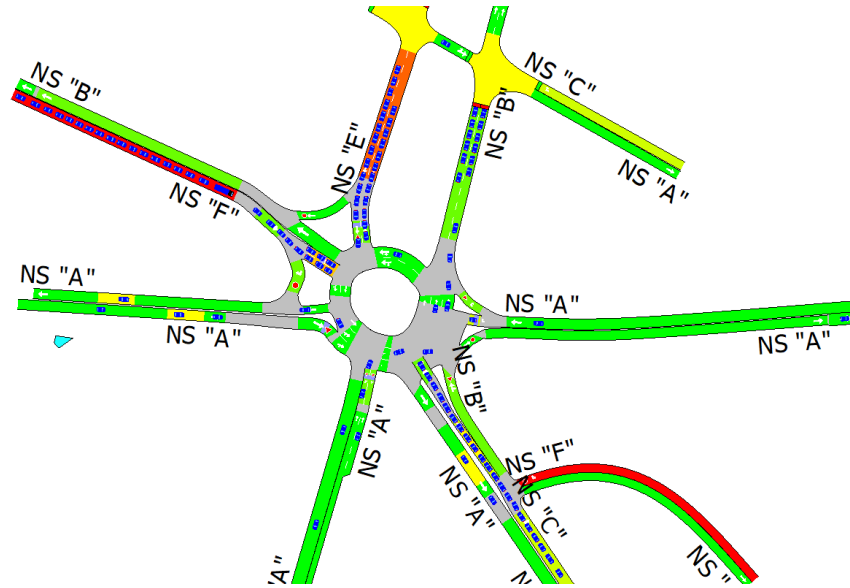
De esta forma, se ha podido evidenciar que a pesar del aumento de capacidad que se ha realizado por parte del Municipio de Cuenca en la rotonda, todavía existen prolongados tiempos de demora para acceder al sistema desde la Av. Fray Vicente Solano N – S, la Av. Don Bosco O-E, Paseo Río Yanuncay o Av. 27 de Febrero, todos con elevadas cargas vehiculares.

5. Escenario Actual con reforma geométrica.

En función de los resultados encontrados, se ha propuesto una reforma geométrica en la rotonda de los “tres puentes”, que permita organizar y distribuir de manera más segura las maniobras que se realizan en la rotonda y ampliar la capacidad en algunas secciones de la rotonda para permitir una mayor distribución de vehículos en un mismo periodo de tiempo, dentro de ese contexto, se ha contemplado generar un carril de conexión directa desde la Av. 24 de Mayo hacia la Av. Fray Vicente Solano, igualmente desde la Paseo Río Yanuncay, y se ha reconfigurado el acceso desde la Av. Don Bosco hacia la rotonda.

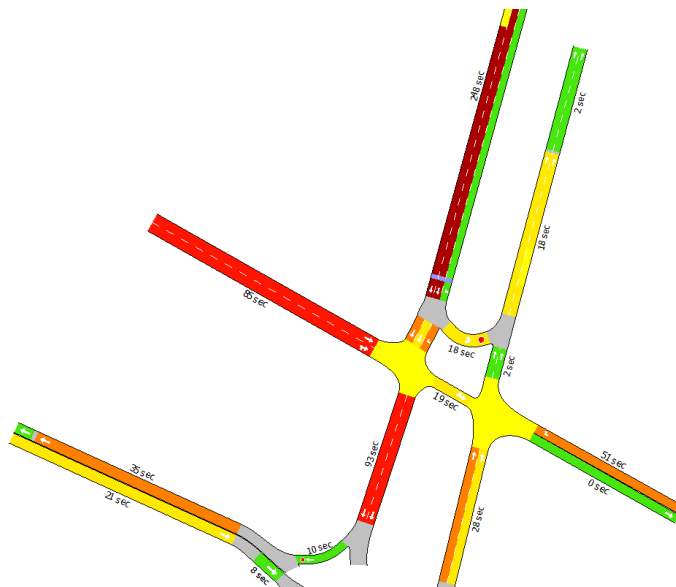
5.1 Nivel de servicio Turbo – Rotonda con tráfico actual.

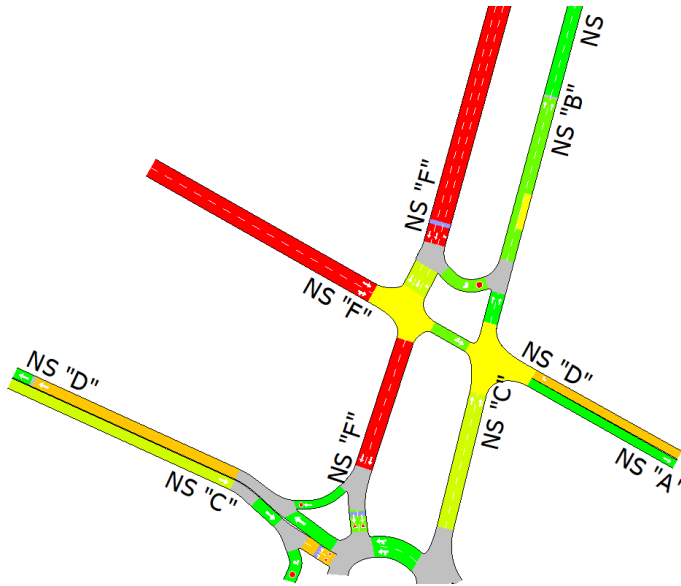




Se ha obtenido un tiempo de demora promedio de 34 segundos en Nivel de servicio "D", mejorando notablemente los niveles operativos, la circulación y la accesibilidad a la rotonda.

5.2 Nivel de servicio intersección semaforizada con turbo – rotonda y estado de tráfico actual.





Sin embargo, el nivel de servicio de la intersección semaforizada es "F", con un tiempo de demora promedio de 166 segundos.

Este particular es debido a que la incorporación vehicular desde la Av. Fray Vicente Solano hacia la rotonda, se ha visto comprometida debido a que la reforma geométrica facilita la incorporación de los demás accesos a la rotonda. Por lo tanto, se considera oportuno que el estudio contemple una reforma mayor para el acceso de la Av. Fray Vicente Solano y también una reconfiguración del regulador semafórico.

6. Reforma geométrica con flujo proyectado:

6.1 Proyección de Demanda:

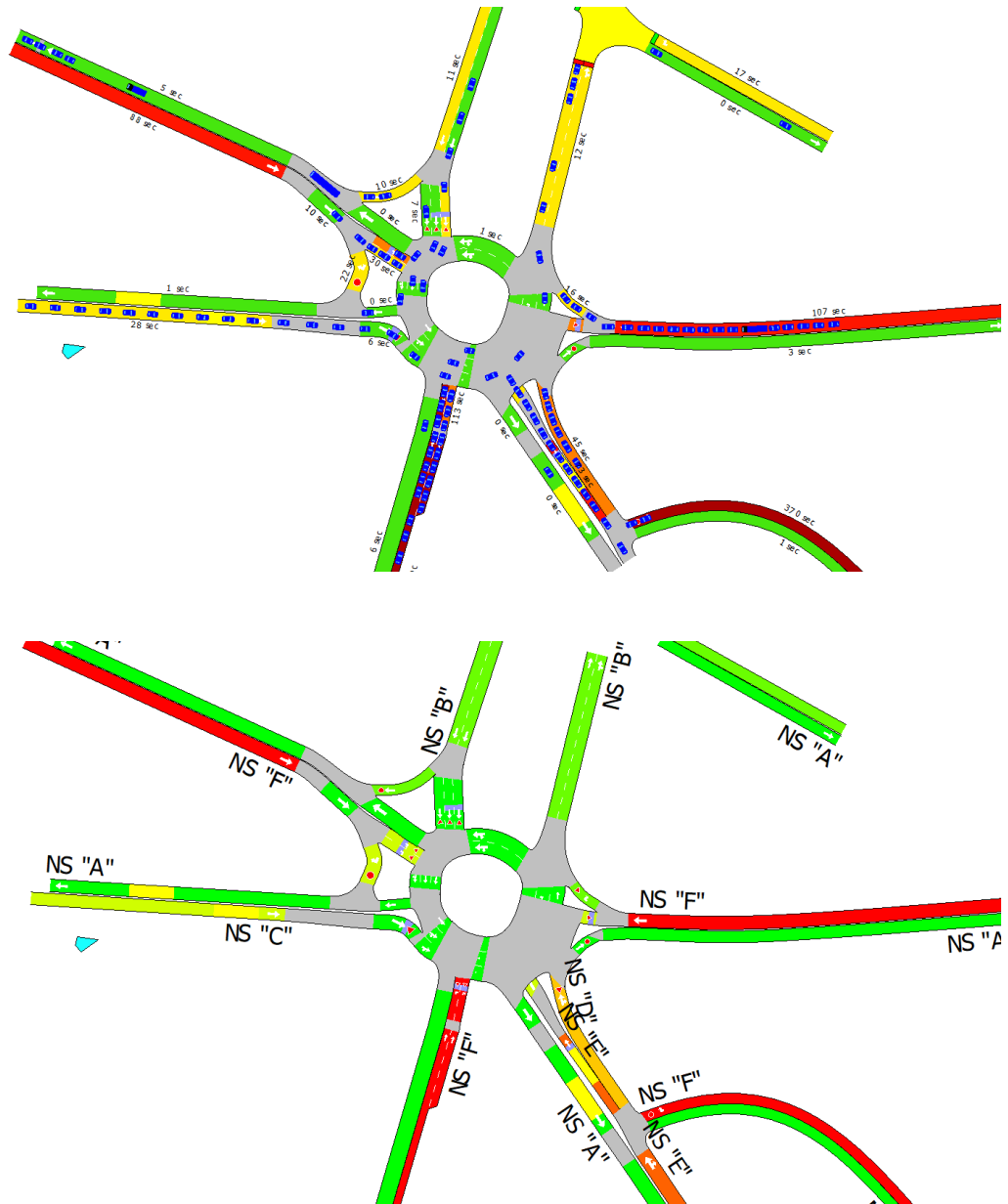
Debido a la elevada tasa de crecimiento del parque automotor en la ciudad de Cuenca, que es mayor que incluso la tasa de crecimiento poblacional, se adoptarán para el análisis las tasas de: 4.5% para vehículos livianos y 3% para vehículos pesados para un periodo de diseño de 10 años.

6.2 Descripción de la Reforma Geométrica:

En virtud del análisis previo y de la información topográfica disponible, se ha considerado una reforma a nivel geométrico que contemple una nueva distribución de secciones en los accesos a

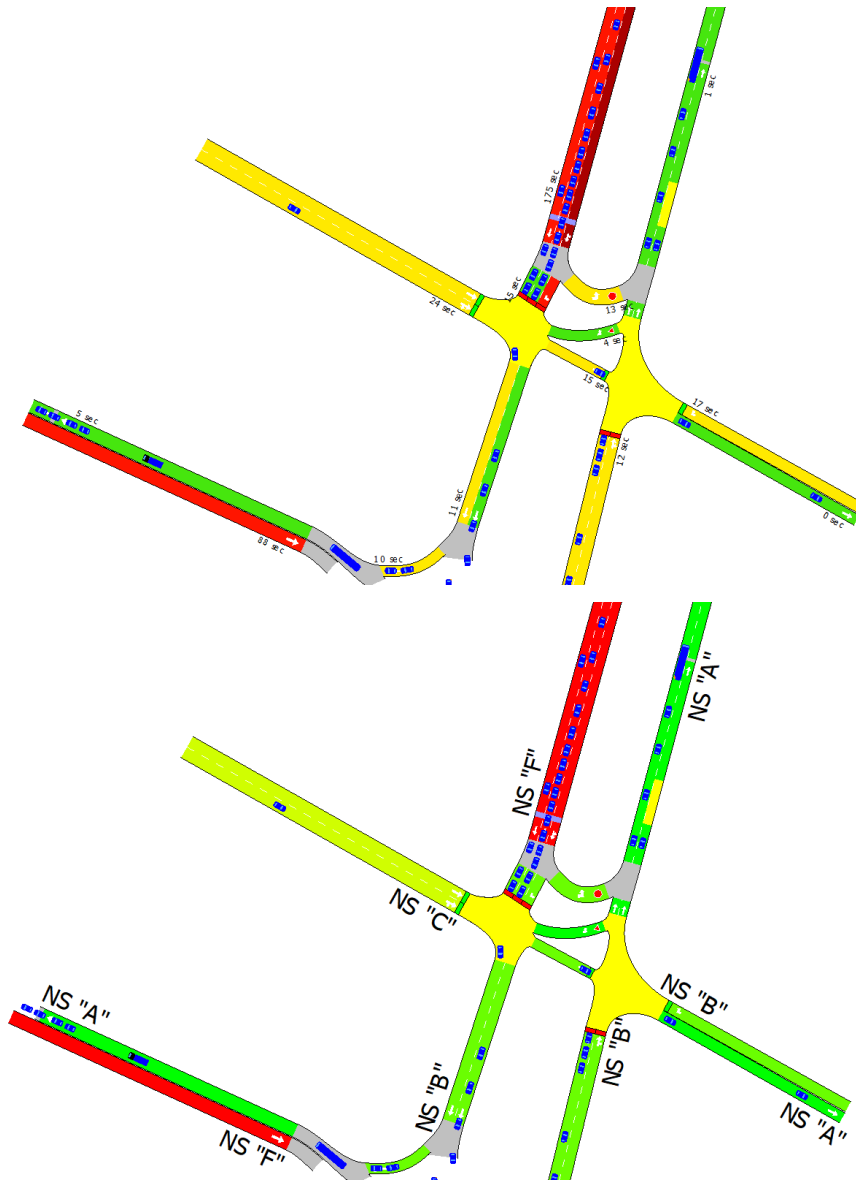
la rotonda. Permitiendo que existan 3 carriles de distribución en casi toda el perímetro. De esta manera, se ha pretendido mejorar la incorporación principalmente de las vías más demandadas que son la Av. Fray Vicente Solano y Av. 24 de Mayo.

6.3 Nivel de servicio con turbo – rotonda en 2035:



Obteniéndose un tiempo de demora promedio de la rotonda de 66 segundos, lo que la ubica dentro del nivel de servicio "F", es decir la reforma planteada, en conjunto con la configuración

semafórica permitirán que en 10 años, la circulación vehicular tenga un nivel de servicio similar al de las condiciones actuales, pero con un tráfico significativamente mayor y con la particularidad de que durante estos 10 años, se tendrían menores tiempos de demora hasta llegar nuevamente a un escenario similar a las condiciones actuales.

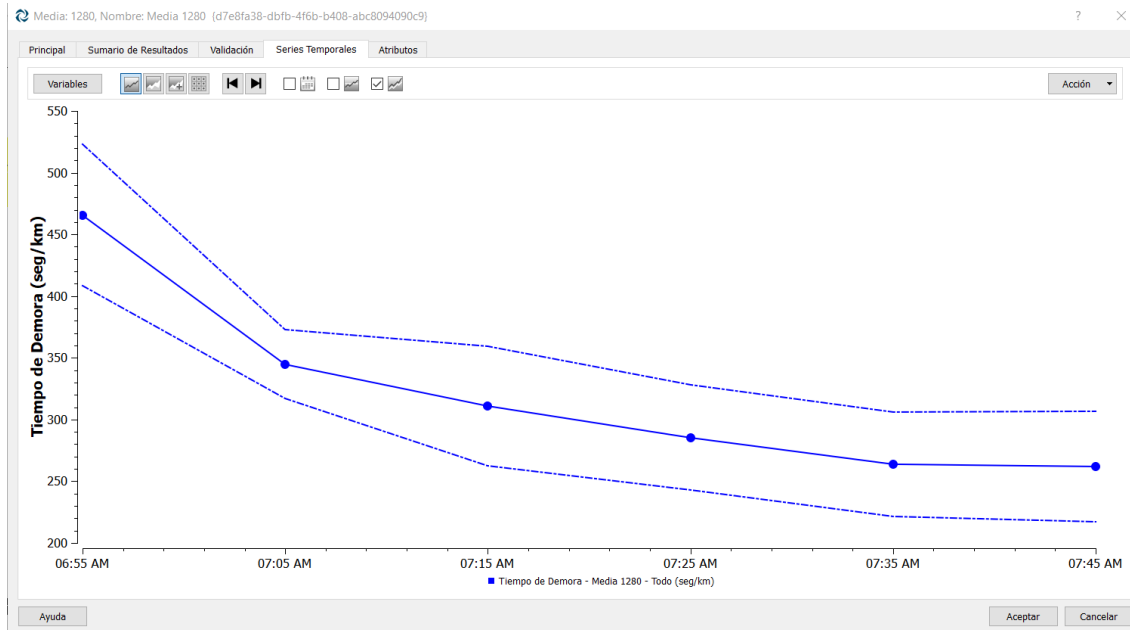


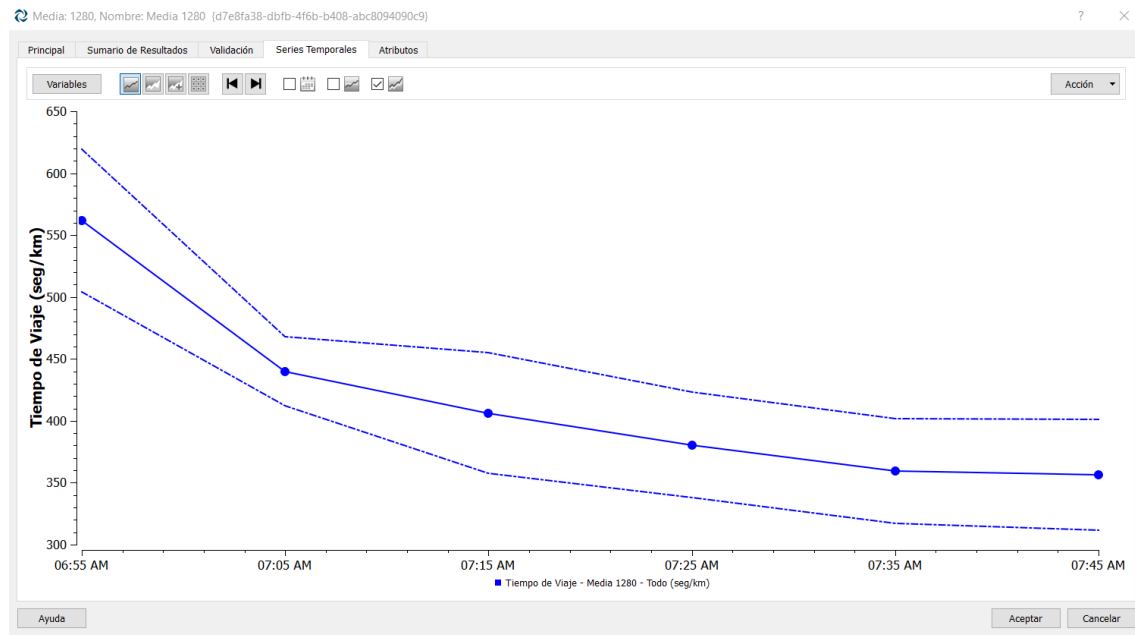
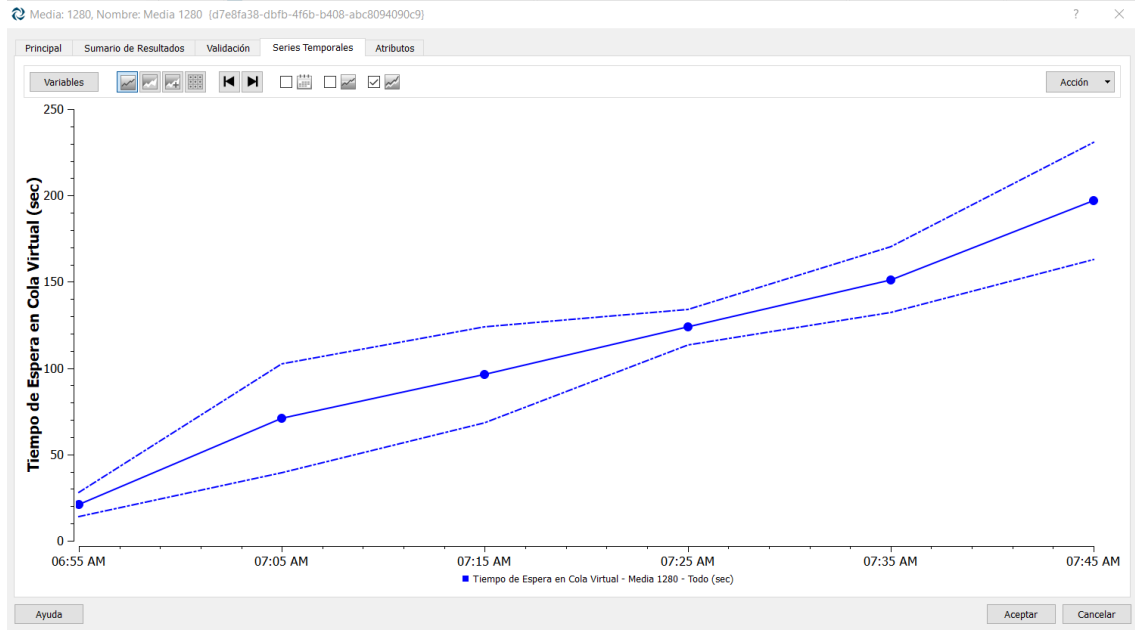
Por su parte, la intersección semafórica presenta un tiempo promedio de demora de 100 segundos, teniendo en cuenta que también se ha implementado un ciclo semafórico más corto que permite una mayor dinámica entre flujos vehiculares, además de que se ha implementado una canalización de tráfico en el acceso a la rotonda, ya que un carril será exclusivo de giro

derecho hacia la Av. Primero de Mayo y el otro permitirá conectarse directamente a 3 carriles de acceso a la turbo – rotonda, cada uno con su respectivo destino.

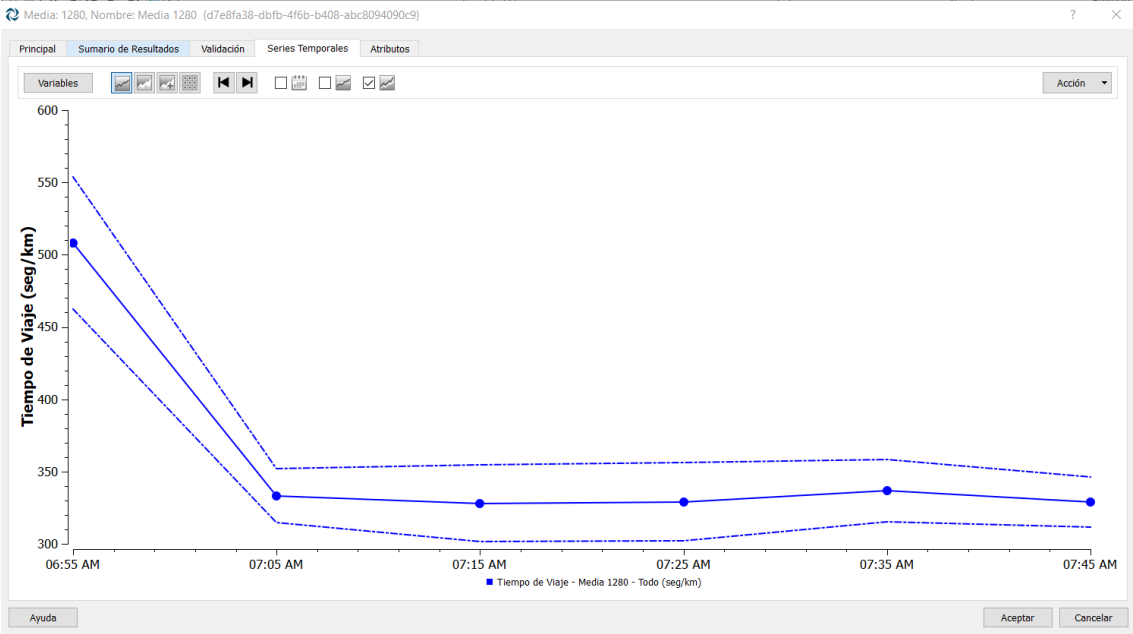
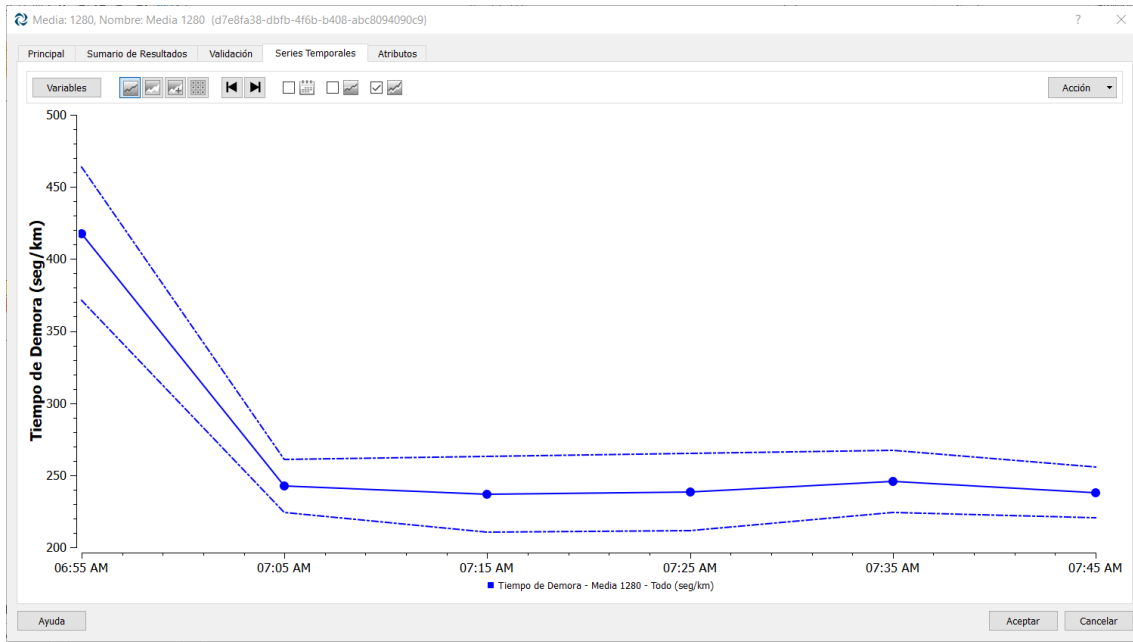
7. Análisis Comparativo

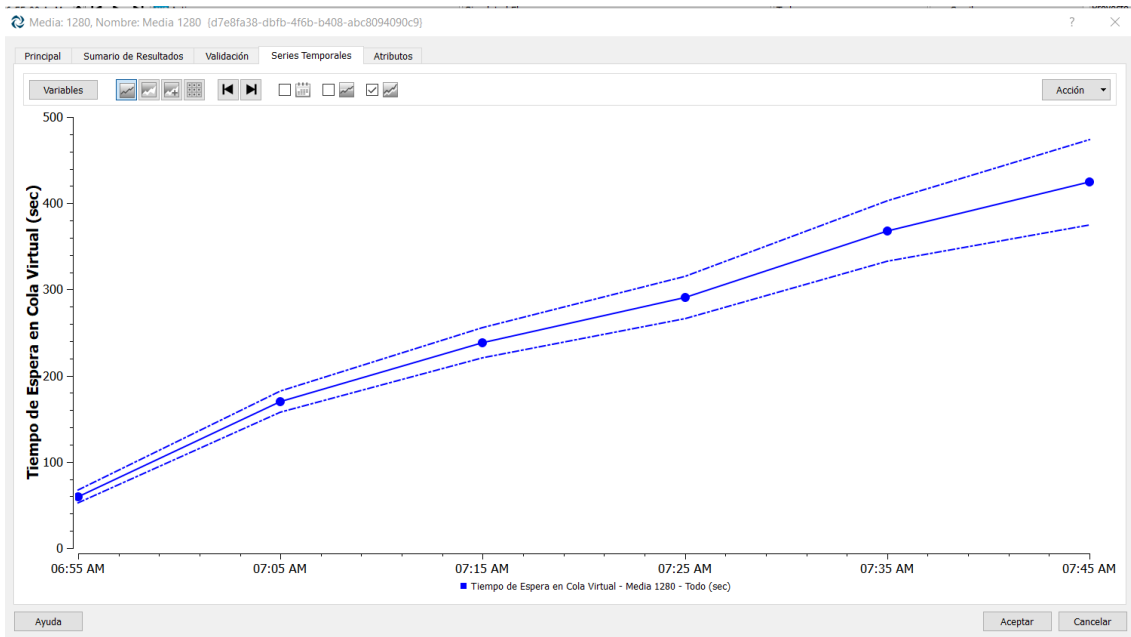
Escenario Actual





Escenario Futuro con Turbo – rotonda.





Con esta información, se puede deducir que si se ejecuta la reforma a nivel geométrico, además de un ligero ajuste de tiempos semafóricos, se tendrá un nivel de servicio optimizado en los distintos accesos a la rotonda durante los próximos 10 años, y al culminar este periodo se mantendrán comportamientos similares al estado actual.